

基于有序树模型的故障检测

邱军林^{1,2} 刘 辉² 李臣明² 王慧斌²

(1. 淮阴工学院计算机与软件工程学院, 淮安, 223003; 2. 河海大学计算机与信息学院, 南京, 211100)

摘 要: 针对分布区域广、结构复杂的系统, 提出了有序树模型来实时、有效地实现故障检测。通过分析复杂结构系统的布局特性, 构建了有序树模型, 实现了对检测数据关联性的有效表示; 利用有序树结点间的关联性和传感器的测量值, 估算出相应结点的数据计算值; 根据相应结点测量值与估计值的关系, 推算出管道运行工况, 实现对复杂系统故障的检测。通过仿真验证了该方法故障检测的有效性, 为系统的维护提供了理论依据。

关键词: 有序树模型; 故障检测; 软测量方法

中图分类号: TP39 **文献标志码:** A

Fault Detection by Ordered Tree Model

Qiu Junlin^{1,2}, Liu Hui², Li Chenming², Wang Huibin²

(1. Faculty of Computer Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian, 223003, China; 2. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing, 211100, China)

Abstract: Ordered tree model for wide-area distribution and complex structure system are proposed, which can effectively realize the fault detection in real-time. Therefore, the characteristics of complex structure system is analyzed and the ordered tree model is built. Relationship is implemented among testing data, using measurement data from sensors and the correlation between orderly tree nodes. Data of the corresponding nodes are calculated according to the relationship between the measured and estimated values of the corresponding nodes. The judgment factors are estimated and fault detection of the complex system is determined. Simulation results demonstrate the proposed method can effectively detect fault and provide the theoretical basis for system maintenance.

Key words: ordered tree model; fault detection; soft measurement method

引 言

近年来, 系统结构的故障检测引起了人们的关注, 特别是分布区域广, 结构较复杂的系统故障检测更是成为很多学者研究的重要方向。城市排水管网是该类系统结构的代表。由于城市迅速扩张、城市人口不断增长和工业持续发展, 使得原有的城市排水管网长期处于超负荷运行状态。该系统的管道长期埋于地下, 城市排水管网系统故障频发, 故障类型多样, 检测困难。一旦发生故障, 将直接影响到人们

的日常学习、生活,且破坏城市环境,我国很多城市出现了“逢雨必淹”、窨井“吃”人等现象。城市管网结构复杂,目前主要采用截留式雨污合流制、雨污分流制和局部区域采用合流与分流形式。系统故障主要有功能性缺陷和结构性缺陷^[1-3]。功能性故障检测主要以检查管道排水能力为目的,一般检测管道的有效过水断面,并将管道实际流量与设计流量进行比较,以确定管道的功能性状况。结构性检测主要以检查管道材料结构状况为目的,这类检测主要为了解管道的结构现状以及连接情况。对于复杂结构的不同故障类型,专家们研究了相应的故障检测设备和检测方法,目前主要以离线方式进行,普遍依赖于单个仪器和设备在现场人工检测。采用的检测设备主要包括^[2]:管道闭路电视、潜望镜、管道扫描与评价设备、管道机器人和超声波装置等。这些检测技术和手段只能满足离线方式的系统故障检测需求。文献[4-6]对各种无损检测技术进行了分类、比较,不同的检测方法在特定的条件下有效地实现了离线故障检测。文献[7,8]基于子网格模型法对排水管道内部的淤积故障进行了检测研究,该方法能很好地实现对结构性故障的有效检测。文献[9]重点介绍了多传感器信息融合的方法对系统故障的离线检测。文献[10-12]利用多种算法实现了特定应用领域的故障检测。以上研究主要针对特定条件下,实现对管道故障的离线检测方法,这些传统方法在特定条件下能取得良好的效果,但很难实现对故障的实时、在线检测。本文提出了一种有序树模型,通过检测有限传感器数据,用软测量的方法实现对复杂结构系统故障的实时、在线检测。

1 系统模型

由于城市排水管网系统结构复杂,很难直接描述系统结构中管道之间的位置关系,以及管道中水流信息之间的逻辑关系。因此,本文将城市排水管网系统的布局抽象为有序树结构模型;利用有序树特性,描述排水管网复杂系统结构管道的位置信息以及管道中水流数据的逻辑关系;利用有序树节点间的逻辑关系,实现城市排水管网各检测点水流信息的估计。其结构模型如图1所示。

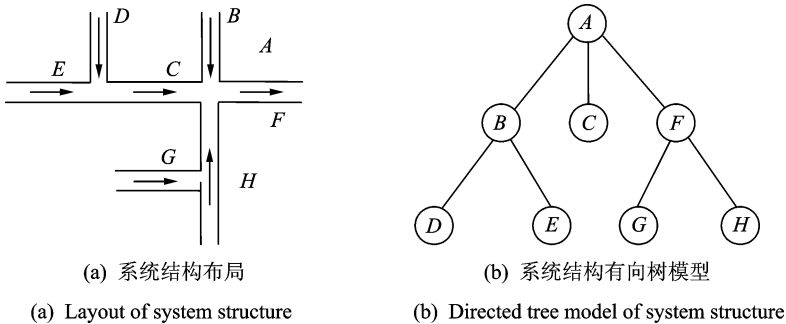


图1 系统结构模型

Fig. 1 Model of system structure

获取越多的数据越有利于有效检测系统故障。城市管网由于结构复杂、长期埋于地下以及传感器昂贵等原因,使得传感器部署受限,只能通过尽量少的传感器数据计算系统结构状态。获得系统有效检测点的水流数据有利于有效检测系统故障。因此,需要对城市排水管网结构进行分析、研究,在关键区域部署有限传感器,实现系统数据有效获取。目前,常用的主要优化部署方法包括:模糊聚类法、动态贴近度法、主成分分析法和物元分析法等。这些方法仅适用于结构较为简单的局部管道,其检测变量较少,检测点间的关联性较低等情况。当面临广域分布、结构复杂的城市排水管网时,由于系统各检测点间的强时间-空间关联性以及系统数据的强耦合性,使得传统的规划部署方法对于多量纲结构优化存在严重不足。因此,选用多量纲对排水管网的结构进行优化,求解排水管网中的关键结点,同时利用覆盖

技术^[13,14]实现系统关键区域水流数据信息覆盖控制,使得在监测点有限的条件下能够有效获取城市排水管网的检测状态估计数据。

2 故障检测方法

2.1 系统故障检测原理

城市排水管道,断面形状多为圆形、矩形或梯形管道。管道中一般为无压力流,遇到暴雨时,会出现压力流,管道水流信息具有特殊性。因此,城市排水管网复杂结构系统可以用动力学方法进行研究。动力学方法的圣维南方程组由连续性方程和动量方程组成,是一阶拟线性双曲型偏微分方程组,表达为

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial z}{\partial x} + gA \frac{Q|Q|}{K^2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: z 为管道内的水位; Q 为断面流量; A 为断面过水面积; B 为断面过水宽度; t 为时间; x 为距离; g 为重力加速度; q 为旁侧入流。考虑到排水管网的特殊性,将其偏微分方程进行线性化简化,得到在特定时刻某段管道 p 点的圣维南方程流量守恒公式为

$$Q_p^O = Q_p^I + Q_p' \quad (2)$$

式中: Q_p^O 表示在某一时刻管道 p 流出的数据量; Q_p^I 为管道 p 的流入数据量; Q_p' 为管道 p 的侧流数据量。利用有序树特性,可以计算 Q_p^I 的值,其计算过程为

$$Q_p^I = q_p + Q_p^I + \sum_{p'=p'.r}^{p' \neq \text{nul}} Q_{p'}^I \quad (3)$$

式中: q_p 为汇入节点 p 流量, $Q_{p'}^I$ 为节点 p 的左节点流入数据值, $\sum_{p'=p'.r}^{p' \neq \text{nul}} Q_{p'}^I$ 为递归计算 p' 右指针连接节点的流入数据值。

2.2 系统数据计算

根据排水管网的二叉树逻辑结构关系,利用从部署的传感器获取的数据,实现系统中所有检测点水流信息的流入/流出数值计算。在计算过程中,假设某检测点的流入总数据等于该检测点的流出数据值,该点的流出数据值等于下一检测点的流入水量数据的一部分。系统中某一检测点流入流出数据计算公式为

$$Q_p^I = Q_p^O + \sum_{p'=p' \times r}^{p' \neq \text{nul}} Q_{p'}^O \quad (4)$$

式中: Q_p^O 为节点 p 的左指针指向节点的管道流出数据值, $\sum_{p'=p' \times r}^{p' \neq \text{nul}} Q_{p'}^O$ 为递归计算图节点 p' 右指针连接节点的管道流入数据值。检测点流入数据计算值的计算过程为(1)从传感器获取数据并存储于有序树的相应结点;(2)利用后序方法遍历有序树,并对相应节点进行标示;(3)判断遍历的节点,若非终止结点,执行步骤(4),否则执行步骤(5);(4)根据式(4)计算向结点的流入水流数据;跳转步骤(2);(5)退出数值计算。对于任一检测点,若该检测点未部署传感器,则该检测点的流出数据量等于其计算所得的流入数据值,否则,该检测点的流出数据量为其传感器时间测量值。利用有限传感器获取数值,分析排水管网逻辑结构关系以及有序树性质,通过以上步骤计算所有检测点的流入/流出水流数据信息,为故障检测提供必要的数据库。

2.3 故障检测、定位和算法实现

本文通过软测量的数据,以及传感器数据,计算部署传感器检测点相应管道的数据偏差率,判断相

应管道的运行工况。其步骤为:采用后序遍历的方法访问所有结点,根据管道流量守恒的水力学模型、通过部署传感器结点的测量值和计算值的关系,计算 p 点测量值与计算值的偏差率,判断相应管道的运行状态,如式(5)所示。其次,根据所选的阈值和计算得到的 τ ,判断相应管道的状态;最后,根据管网中水流信息的“上下游”关系,判断管道发生故障的相应位置,则

$$\tau = \left| \frac{Q_p^l - Q_p}{Q_p} \right| \quad (5)$$

式中: τ 为 p 点测量值与计算值的偏差率; Q_p^l 为通过式(4)计算得到的汇入点 p 的流入水流数据值流量, Q_p 为通过传感器获取该检测点的水流数据值。本文分析了管网结构,解析了管网检测点之间的逻辑关系,提出了系统故障检测的基本原理,利用部署传感器监测数据,推算出未部署传感器检测点流入/流出水流数据量。通过部署传感器监测点的监测数据和推算数据的关系,判别排水管网运行状态。若管网运行状态异常,推算出发生故障类型并定位管道发生故障的位置。其算法执行流程图如图2所示。通过图2可知,利用部署传感器的监测水流数据量和管网结构关系,通过3个步骤实现了系统的故障检测。其步骤为:(1)计算检测点流入/流出数据量;(2)判断管网状态、识别故障类型;(3)故障点定位。

3 故障检测仿真与分析

本文为了验证该方法的有效性,选择了昆山开发区A区进行了验证。该区共有检测点23个,通过本文提出的优化方法,在其中12个检测点部署了深圳明康伟业科技有限公司的MK-WT5超声波流速水位测量仪。该测量仪器包括超声组件和信号处理电路,仪器放置在水区底部,测量水面到以前的水位深度,使用超声多普勒原理测量水流。实验中,传感器检测的数据流量,通过从传感器获取到的流速、水位数据以及水流的截面积,计算出所有检测点的截面都是矩形。其中传感器检测的流量通过公式 $Q = v \times h \times l$ 获得。其中 Q 为传感器检测的流量, v 为从传感器获得的流速, h 为传感器测得的水位高度, l 为检测点的宽度。实验第1组数据选取了2013年6月20日中午12时,部署传感器检测点的数据如表1所示。表1数据表示部署了传感器检测点水流流入数据的测量值和利用有序树模型计算相应检测点的测量值。利用式(5),对表1数据计算相应检测点管道状况的偏差率,结果如图3所示。图3曲线表示在同一时刻,相应检测点故障偏差率。选取不同阈值时,各检测点相应的管道状况不同。当阈值选取大于0.15时,复杂管网系统状况良好,没有出现故障;当 $0.1 < k < 0.15$,该区域有1个地方发生故障,即检测点13[#]有异常,发生故障,故障发生在13[#]上游;当 $0.05 < k < 0.1$ 时,系统多个检测点有故障发生。通过人工检查,在系统13[#]检测上游管道时发生了破损,有水流流出。由于传感器自身因素以及排水管道的结构特性,使得测量结果有一定的误差。因此,阈值选取应该在0.14左右。实验第2组数据是选择9[#]检测点在不同时间的一组数据。数据如表2所示。利用表2数据,计算9[#]检测点在不同时间的偏差率,结果如图4所示。通过图4曲线分析,系统故障检测偏差率受管道内水流、水位影响。在无压条件下,水位过低,测量误差较大。由以上实验数据分析,检测点的判断因子值计算受到检测仪器本身精度、管道内水流水位的影响;系统状态的判断与阈值选取有关。测量仪器自身制造精度将直接影响算法的测量结果。管道结构复杂,当管内的水位比较低的时候,也将影响到传感器测量精度。整个方法计算所

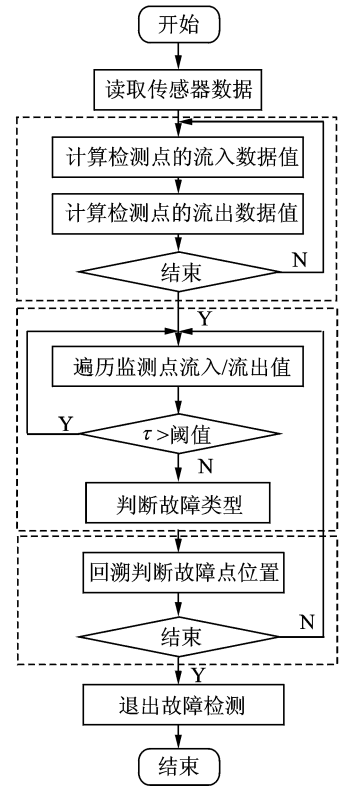


图2 故障检测算法流程图
Fig. 2 Flow diagram of fault detection algorithm

得误差在 0.15 左右,因此,阈值取值在 0.15 左右。当取值过小时,受系统测量误差影响,将会对状态好的管道故障发生误判;当选取较大时,将会把发生故障的管道,误判为状态良好。文献[15]提出了基于 Kalman 滤波器管道泄漏检测优化算法。该算法分析了管道泄漏检测原理,提出了 Kalman 滤波器的泄漏检测算法,实现了管道泄漏检测、管道泄漏点定位,通过实验验证了该方法的有效性。采集到的检测压力数据受到噪声的干扰严重,基于 Kalman 滤波器方法能够去除一定噪音对工况操作的干扰,但还是影响管道泄漏检测的准确性和泄漏点定位的有效性。传统故障检测方法主要是利用人工检测设备测量、采用离线检测故障方法。由于城市排水管网结果复杂、长期埋于地下,给检测带来了一定困难。该方法不仅效率低下、检测周期长而且很难对复杂结构的管道实现完全检测。

表 1 获取的传感器数据

Tab.1 Sensor data												m ³ /s
检测点编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	5 [#]	9 [#]	11 [#]	13 [#]	15 [#]	18 [#]	19 [#]	21 [#]	23 [#]
计算值	0.631	0.219	0.112	0.092	0.131	0.098	0.151	0.067	0.098	0.083	0.132	0.122
测量值	0.612	0.210	0.117	0.100	0.121	0.091	0.127	0.073	0.105	0.079	0.138	0.116

表 2 传感器获取的 9[#] 数据

Tab.2 Sensor data of 9 [#]											m ³ /s
时间	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:30	12:00	
计算值	0.150	0.152	0.148	0.143	0.139	0.131	0.136	0.145	0.155	0.151	
测量值	0.142 45	0.145	0.140	0.134	0.128	0.121	0.126	0.136	0.148	0.143	

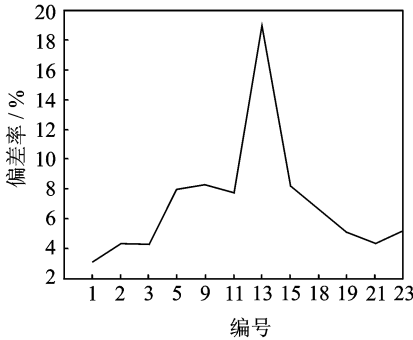


图 3 某时刻不同检测点的偏差率

Fig. 3 Deviation rate of different detection points at certain time

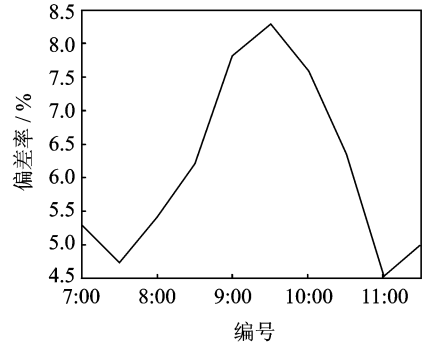


图 4 9[#] 检测点不同时刻的偏差率

Fig. 4 Deviation rate of 9[#] detection point at different time

4 结束语

本文提出一种基于有序树模型的故障检测,突破了传统管道故障直接检测的方法,通过对部署的有限传感器监测数据,利用软测量方法,实现管网运行状态识别、管道故障检测和故障位置定位。该方法为复杂系统结构布局的分析建立了有向树结构模型;利用有限传感器测量数据计算系统所有检测点的水流数值;根据相应检测点计算数值和传感器测量值的关系,计算相应管道状况偏差率,实现了管道故障的检测。系统仿真验证了本文提出的软测量方法能够有效实现管道运行状态实时、在线的检测。该方法克服了传统人工巡视、离线测量方法存在的弊端,提高了故障检测效率,缩短了管网故障检测周期,为复杂结构系统维护提供依据。但是,所部署传感器测量精度和本文提出检测方法自身参数的选择将

会影响本方法对城市管网运行状态、故障类型识别和故障点定位等结果的准确性。

参考文献:

- [1] 严敏,高乃云. 现代排水管道检测技术[J]. 给水排水,2007,33(1):110-112.
Yan Min, Gao Naiyun. Measurement technologies in modern sewer system[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007,33(1):110-112.
- [2] 李田,郑瑞东,朱军. 排水管道检测技术的发展现状[J]. 中国给水排水,2006,22(12):11-13.
Li Tian, Zheng Ruidong, Zhu Jun. Development of sewer inspection and assessment technologies [J]. *China Water & Wastewater*, 2006,22(12):11-13.
- [3] Huang Chienlin, Hsu Niensheng, Wei Chihchiang. Real-time pumping station operation for an urban drainage system using artificial intelligence[J]. *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 2012,58(3):64-79.
- [4] Wu Lei, Long Tianyu, Liu Xia, et al. Simulation of soil loss processes based on rainfall runoff and the time factor of governance in the Jialing river watershed China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012,184(6): 3731-3748.
- [5] Giorgio M, Gaspare V. Receiving water quality assessment; Comparison between simplified and detailed integrated urban modeling approaches[J]. *Water Sci Technol*, 2010, 62 (10):2301-2312.
- [6] Emili L A, Greene R P. Modeling agricultural non point source pollution using a geographic information system approach[J]. *Environmental Management*, 2012,51: 70-95.
- [7] Jeffrey N, Guy S, Paul B. A subgrid channel model for simulating river hydraulics and flood plain inundation over large and data sparse areas[J]. *Water Resources Research*, 2012,48(11): WR012514
- [8] 李果,张鹏,李学仁,等. 基于动态主要分析法的传感器故障检测[J]. 数据采集与处理,2008,23(3):338-343.
Li Guo, Zhang Peng, Li Xueren, et al. Sensor fault detection based on dynamic principle component analysis[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2008,23(3):338-343.
- [9] Paiva R C, Collischonn W, Buarque D C. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the amazon[J]. *Hydrological Processes*, 2013,27(3): 333-346.
- [10] Piatyszeka E, Voignier P, Graillot D. Fault detection on a sewer network by a combination of a Kalman filter and a binary sequential probability ratio test[J]. *Journal of Hydrology*, 2000,230:258-268.
- [11] Matison V A, Semenov A G, Vasil'Ev K S, et al. Pump station combined control based on high-voltage electric drives[J]. *Russian Electrical Engineering*, 2011,82(1): 7-10.
- [12] 喇元,田立斌,陈婷,等. 基于贝叶斯控制图的变压器故障诊断决策[J]. 数据采集与处理,2012,27(S2):379-383.
La Yuan, Tian Libin, Chen Ting, et al. Transformer fault diagnosis and decision-making based on Bayesian control chart[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2012,27(S2):379-383.
- [13] Xu Lizhong, Li Xiaofang, Yang Simon X. Intelligent information processing and system optimization[J]. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 2011,17(7):829-833.
- [14] Tan Guoping, Li Yueheng. An adaptive HEC scheme with variable packet size for wireless real-time reliable multicast[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2012,21(2):299-303.
- [15] 张德法,韩京. 管道泄漏检测优化算法的研究与仿真[J]. 计算机仿真,2012,29(4):401-404.
Zhang Defa, Han Jing. Pipeline leak detection of optimization algorithm research and simulation [J]. *Computer Simulation*, 2012,29(4):401-404.

作者简介:



邱军林(1977-),男,博士,讲师,研究方向:智能计算、工业大数据技术, E-mail: qjl222@163.com.



刘辉(1981-),男,博士研究生,研究方向:无线传感器。



李臣民(1969-),男,副教授,研究方向:复杂系统建模仿真、智能信息处理。



王慧斌(1967-),男,博士,教授,研究方向:信息获取与智能系统、复杂系统建模与优化。

