

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.17.018

# 基于动态均值感知器的拍门污水泄漏精准检测系统

姜楠<sup>1</sup>, 封莉<sup>1</sup>, 林子茵<sup>2</sup>, 毕海涵<sup>3</sup>

(1. 北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641; 3. 北京林业大学 信息学院, 北京 100083)

**摘要:** 采用均值检测原理与感知器神经网络分类原理,基于动态均值感知器神经网络分类模型,研发了排水管网拍门污水泄漏精准检测系统。首先,以固有拍门临界工作气压为中心逐次对称增压/减压 20 kPa,并连续 9 次检测拍门位置状态,组成 9 维动态特征向量;然后与 9 维均值权重向量加权求和,提取动态均值特征量;最后,通过阶跃激活函数,采用输出阈值分类检测拍门污水泄漏状态,并训练输出阈值为 3.6。在广州市猎德涌进行了现场测试,拍门污水泄漏检测精度为 96%。该方法有效解决了误检和漏检问题,从而减少了排水管网的拍门污水泄漏。

**关键词:** 排水管网; 拍门; 污水泄漏; 随机误差; 均值检测; 神经网络; 感知器

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)17-0118-05

## Precise Detection System for Sewage Leakage in Pneumatic Flap Doors Based on Dynamic Mean Perceptron Neural Network

JIANG Nan<sup>1</sup>, FENG Li<sup>1</sup>, LIN Zi-yin<sup>2</sup>, BI Hai-han<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. School of Information, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the principles of mean detection and perceptron neural network classification, a dynamic mean perceptron neural network classification model was used to develop a precise detection system for sewage leakage in pneumatic flap doors of drainage network. Firstly, pressure was symmetrically increased/decreased by 20 kPa with the inherent critical working pressure  $P$  as the center, and the position and state of the flap door 9 times was continuously detected to form a 9-dimensional dynamic feature vector. Then, by weighting and summing with the 9-dimensional mean weight vector, the dynamic mean feature quantity was extracted. Finally, by using a step activation function, the output threshold classification was used to detect the leakage status of the sewage in the flap door, and the output threshold was trained to be 3.6. The on-site application system test of Liede Chong in Guangzhou City showed that the accuracy of the sewage leakage detection of the flap door was 96%. This method effectively solves the problems of the random and systematic errors of detection results, thereby reducing the leakage of sewage in the drainage network.

**Key words:** drainage network; flap door; sewage leakage; random error; mean detection; neural network; perceptron

通信作者: 封莉 E-mail: fengli@bjfu.edu.cn

合流制排水系统普遍存在严重的溢流污染,制约了城市水环境的持续改善<sup>[1]</sup>。在排水管网排水口安装拍门,实现雨天排涝、旱天截污的功能,已成为控制合流制溢流污染的关键技术措施,在国内外得到了广泛采用。目前我国排水管网安装约百万座拍门,普遍使用的重力拍门存在“打不开,关不严”的功能性问题,电动拍门、液压拍门则需要接入动力电或自来水液压管道,成本高且施工困难。为此,课题组设计了气动拍门截污装置,并在广州市猎德涌进行了现场测试,不仅解决了重力拍门的功能性问题,而且实现了极限低功耗的一次性电池续航供电,消除了拍门安装条件限制。但是在拍门控制关闭状态下,由于拍门出口杂物阻挡造成拍门存在缝隙并导致污水泄漏,这也是上述所有拍门的共性问题<sup>[2-3]</sup>,亟待改进。

拍门污水泄漏的自动检测可以及时发现污水泄漏并处理。目前,拍门污水泄漏的自动检测<sup>[4-5]</sup>主要是通过检测拍门关闭位置传感器状态(开启/关闭)来判断拍门污水泄漏状态(泄漏/密封),具有成本低、效率高等优点,但是检测结果存在较大误差,易导致误检和漏检,造成水体污染。针对上述问题,基于动态均值感知器神经网络分类模型,研发了排水管网拍门污水泄漏精准检测系统。现场测试表明,该方法可以有效降低检测结果的随机误差和系统误差,减少误检和漏检。若全国普及应用该系统,每年可减少污水排放约 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,减少碳排放约 $360 \times 10^4 \text{ t}$ ,具有较好的应用价值。

## 1 气动拍门泄漏检测的随机误差分析

### 1.1 气动拍门结构与泄漏检测工作原理

前期研发并在广州市猎德涌现场安装测试的气动拍门装置,由拍门、气动机械臂、气压传感器、拍门关闭位置传感器、智能控制器和网络通讯模块组成,其结构与原理如图1所示。拍门关闭位置传感器安装在拍门上,采用非接触式磁簧管开关传感器模块,由磁铁和磁簧管开关组成,分别安装在拍门盖和底座上,拍门关闭时磁铁接近磁簧管开关导通,拍门开启时磁铁离开磁簧管开关断开,形成拍门关闭位置状态信号(开启/关闭);气压传感器安装在气动机械臂上,采集气动机械臂的工作气压信号。智能控制器分别与气动机械臂、气压传感器、拍门关闭位置传感器连接,其拍门泄漏检测工作原

理如下:首先,接收拍门关闭控制信号,并以拍门关闭临界工作气压驱动气动机械臂,控制拍门关闭;其次,采集拍门关闭位置传感器状态信号,并根据拍门关闭位置状态信号(开启/关闭)判断拍门泄漏状况(泄漏/密封);最后,网络通讯模块与智能控制器连接,用于接收拍门泄漏状况数据,并通过云服务网络实时传输拍门泄漏状况,通知人工处理。

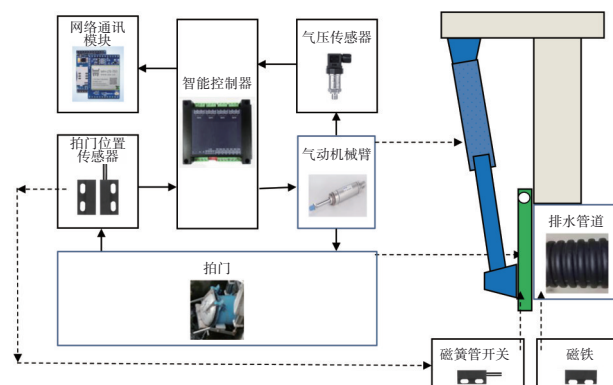


图1 气动拍门结构与原理

Fig.1 Structure and principle of pneumatic flap door

### 1.2 气动拍门泄漏检测的误差分析

根据误差分析理论,所有检测设备都存在随机误差和系统误差。由上述气动拍门泄漏检测工作原理可知,拍门污水泄漏检测的随机误差主要取决于拍门关闭位置传感器的检测精度 $X$ (通常指该传感器检测的拍门关闭临界位置与真实拍门泄漏临界位置之间的最大距离),约为3~5 mm;同时,由于拍门关闭位置传感器损坏等系统异常因素,将导致拍门污水泄漏检测的系统误差。根据中心极限定理,系统正常工作时,单次拍门关闭位置检测结果为“真实拍门泄漏临界位置”与“随机误差”之和;多次拍门关闭位置检测结果服从以均值为真实拍门泄漏临界位置的正态分布,所以多次拍门关闭位置检测结果的随机误差也服从正态分布<sup>[6]</sup>。

## 2 均值检测与感知器神经网络分类原理

### 2.1 均值检测原理

多次拍门关闭位置检测结果的随机误差服从正态分布,具有对称性、抵偿性、趋中性,因此根据检测误差传播定律,对多次拍门关闭位置检测结果求平均值可以明显减小随机误差的影响。采用9次检测结果求均值的均值检测方法,可减少66%的检测结果随机误差,提高检测拍门污水泄漏状态的精度。平均值的标准差与重复检测次数 $n$ 的开平方成

反比,具体计算如式(1)所示。

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为单次检测结果标准差; $\sigma_{\bar{x}}$ 为多次检测结果平均值的标准差。其中, $\sigma$ 采用式(2)计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中: $y_i$ 为检测值( $i=1,2,\dots,n$ ); $\bar{y}$ 为检测值的平均值。

## 2.2 感知器神经网络分类原理

神经网络包括FF、BRF、DFF、RNN等约27种,感知器是其中的一种单层神经网络的监督学习算法<sup>[7]</sup>,其结构如图2所示,包括输入向量 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 、权重向量 $\mathbf{w}=(w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ 、求和单元 $\Sigma$ 、激活函数 $f()$ 和输出 $y$ 。

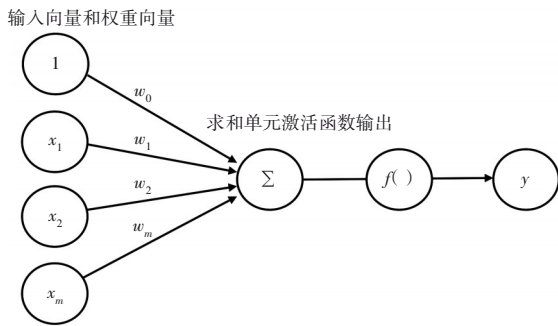


图2 感知器结构

Fig.2 Perceptron structure diagram

感知器神经网络分类检测拍门污水泄漏状态(密封/泄漏)的原理:采集输入特征向量 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ ,其中 $x_m$ 为第 $m$ 次检测的拍门关闭位置传感器状态(开启或关闭);设计均值权重向量 $\mathbf{w}=(w_1, w_2, \dots, w_m)^T=(1/m, 1/m, \dots, 1/m)^T$ ;采用求和单元 $\Sigma$ 实现输入特征向量与均值权重向量的加权求和,将输入信号线性化后作为特征量,其表达式(3),其中 $-w_0$ 为输出阈值。

$$G(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + w_0 = (x_1 + x_2 + \dots + x_m)/m + w_0 \quad (3)$$

激活函数采用阶跃函数Sgn,输入特征量,根据输出阈值,然后运算给出分类输出结果 $y$ (密封/泄漏),对于任一模式 $x$ 有如下关系式:

$$y = f(\mathbf{w}^T \mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{若 } \mathbf{w}^T \mathbf{x} > -w_0 \text{ 可判别拍门密封} \\ 0 & \text{若 } \mathbf{w}^T \mathbf{x} < -w_0 \text{ 可判别拍门泄漏} \end{cases} \quad (4)$$

## 3 动态均值感知器神经网络分类模型研究

根据上述检测结果的随机误差分析结果,基于感知器神经网络分类原理和均值检测原理,设计动态均值感知器神经网络分类模型,分类检测拍门污水泄漏状态(密封/泄漏)。具体研究路线见图3。

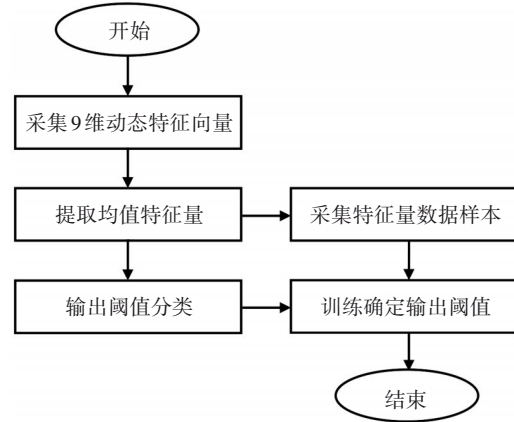


图3 分类模型研究路线

Fig.3 Research route of classification models

### 3.1 采集9维动态特征向量,形成感知器输入

① 以固有拍门关闭临界工作气压 $P$ 为中心逐次对称增压/减压20 kPa,即: $P_5=P, P_1, P_2, P_3, P_4$ 在 $P$ 的基础上分别减少80、60、40、20 kPa,  $P_6, P_7, P_8, P_9$ 在 $P$ 的基础上分别增加20、40、60、80 kPa,形成9种动态拍门关闭工作气压检测状态( $P_1 \sim P_9$ )。

② 连续进行9次动态检测拍门关闭位置传感器状态,得到9个检测结果(开启或关闭),若检测结果 $x_i$ 为开启,则取值为 $x_i=0$ ;若检测结果 $x_i$ 为关闭,则分别取值为 $x_i=1, 2, \dots, 9$ 。

③ 将9次动态检测结果顺序排列,形成9维动态特征向量 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ ,其中, $m=9$ ,形成感知器输入。

其中,在9种动态拍门关闭工作气压 $P$ 检测状态( $P_1 \sim P_9$ )调节范围内至少有1个与系统固有拍门关闭临界工作气压 $P$ 的正常检测工况匹配,抵消拍门内部水位波动干扰引起的固有临界工作气压条件变化,从而自动调节和保证系统正常检测工况,降低检测结果的方法系统误差;同时在系统正常工况下9维动态特征向量 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 为非0特征向量,若为0特征向量则为拍门关闭位置传感器损坏(一直处于磁簧管开关断开状态)异常,因此可以有效检测并排除拍门关闭位置传感器损坏异常导致的系统误差输入。



### 3.2 感知器加权求和,提取均值特征量

① 设计感知器均值权重向量  $w=(w_1, w_2, \dots, w_m)^T=(1/9, 1/9, \dots, 1/9)^T$ , 其中,  $m=9$ 。

② 感知器求和单元加权求和,即将9维动态特征向量与9维均值权重向量加权求和,获得9次检测结果平均值为均值特征量,见式(5)。

$$G(x) = w^T x + w_0 = (x_1 + x_2 + \dots + x_m)/9 + w_0 \quad (5)$$

式中:  $w^T x$  为9次检测拍门位置状态的均值,感知器加权求和的同时也完成了多次检测拍门位置状态检测值求平均值,可明显减小随机误差的影响。

### 3.3 输出阈值分类,完成感知器输出

激活函数采用阶跃函数和符号函数;采用输出阈值对拍门污水泄漏状态(泄漏/密封)进行分类,完成感知器分类输出。感知器输出  $y$  反映了拍门泄漏状态,它是一个阶跃函数,输入输出关系见式(4)。

### 3.4 训练测试感应器,确定输出阈值

采集上述9维动态特征向量数据样本100组,首先,采用逐次减压(10 kPa)控制方法,人工观察拍门泄漏与密封临界状态,确定并控制拍门关闭临界工作气压  $P$ ;其次,采用逐次增加拍门外向水平拉力的方法,模拟产生5种拍门泄漏标签状况,并采用逐次增加拍门内向水平拉力的方法,模拟产生5种拍门密封标签状况;最后,对应每种标签分别采集上述9维动态特征向量数据样本约10组,见表1。其中,不同值检测均值  $w^T x$  对应不同的拍门泄漏与密封状态,数值越大表示密封程度越好。

表1 9维动态特征向量数据样本分布情况

Tab.1 Sample distribution of 9-dimensional dynamic feature vectors data

标签	不同气压时的位置状态									均值 $w^T x$
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	
泄漏5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
泄漏4	0	0	0	0	0	0	0	0	9	1.00
泄漏3	0	0	0	0	0	0	0	8	9	1.88
泄漏2	0	0	0	0	0	0	7	8	9	2.66
泄漏1	0	0	0	0	0	6	7	8	9	3.33
密封1	0	0	0	0	5	6	7	8	9	3.88
密封2	0	0	0	4	5	6	7	8	9	4.33
密封3	0	0	3	4	5	6	7	8	9	4.66
密封4	0	2	3	4	5	6	7	8	9	4.88
密封5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	5.00

采用训练组样本100组和留一交叉验证法(LOO-CV),以及上述动态均值感知器神经网络分类模型,遍历寻优检测准确度最高的输出阈值,建立动态均值感知器神经网络分类模型。训练结果表明,输出阈值  $-w_0$  为均值  $w^T x=3.6$ ,均值特征量  $>3.6$  时,感知器输出  $y$  为密封状态;均值特征量  $<3.6$  时,感知器输出  $y$  为泄漏状态。

## 4 精准检测应用系统设计与测试

### 4.1 系统设计

基于前期研发并在广州市猎德涌现场安装测试的气动拍门装置,不改变其硬件结构,仅采用上述动态均值感知器神经网络分类模型研究结果补充其软件算法设计,研发排水管网拍门污水泄漏精准检测应用系统(见图1),其中精准检测拍门污水泄漏状态(密封/泄漏)软件算法流程见图4。

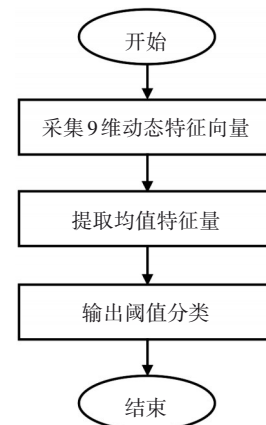


图4 精准检测流程

Fig.4 Precision detection process diagram

### 4.2 应用系统功能测试

2024年1月在广州市猎德涌现场安装拍门污水泄漏精准检测系统(见图5),并对拍门缝隙污水泄漏状态(密封/泄漏)精准检测性能进行应用测试。其中,拍门直径为65 cm,(双)气缸直径为3.2 cm,拍门关闭临界工作气压为500 kPa,拍门质量为10 kg,拍门中心与内涝下限水位距离为2.5 m。

选取0、0.3、0.5、1.5、3.0 cm等5种不同直径的树枝阻挡拍门关闭,模拟5种实际拍门缝隙污水泄漏状态,各进行10次测试(共50次)。结果表明,分别检测成功9、9、10、10、10次,即:正确拍门缝隙污水泄漏状态为48次,误检和漏检各1次,总体检测精度为96%,实现了对物体阻挡拍门关闭导致的拍门缝隙污水泄漏的有效检测。



a. 现场测试系统

b. 拍门缝隙

图5 拍门缝隙泄漏检测现场测试

Fig.5 On site testing of leakage detection in the flap door

分析检测精度较高的原因为:该模型采用均值检测原理,降低了检测结果的随机误差;同时,模型的正常检测工况为固有拍门关闭临界工作气压状态,采用9维动态特征向量检测方法在一定范围内自动调节拍门内部水位波动干扰引起的正常检测工况变化,降低了检测结果的系统误差,从而显著减少了误检和漏检。但是实际排水管道内部运行水位不断变化,在极少数情况下(拍门内部水位过高或过低)也可能严重超出上述9维动态特征向量的自动调节范围,偏离模型的正常检测工况,从而产生误检和漏检各1次。

## 5 结论

① 基于动态均值感知器神经网络分类模型和人工智能算法研发的排水管网拍门污水泄漏精准检测系统,可以有效减少拍门污水泄漏。

② 动态均值感知器神经网络分类模型以固有拍门临界工作气压为中心,逐次对称增压/减压20 kPa,并连续9次检测拍门位置状态,组成9维动态特征向量,并与9维均值权重向量加权求和,提取动态均值特征量;且通过阶跃激活函数,采用输出阈值分类检测拍门污水泄漏状态。模型训练输出阈值为3.6,当均值特征量>3.6时,感知器输出为密封状态;当均值特征量<3.6时,感知器输出为泄漏状态。

③ 排水管网拍门污水泄漏精准检测应用系统的检测精度高达96%,性能优良,有效降低了检测结果的随机误差和系统误差。

## 参考文献:

- [1] WANG T, ZHANG Y H, LI H Z, *et al.* Policies on combined sewer overflows pollution control: a global perspective to inspire China and less developed countries

[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2024, 54(14):1050-1069.

- [2] 邱维,汪传新,阮小燕.广州市河涌截污存在的问题及对策[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(2): 10-12.

QIU Wei, WANG Chuanxin, RUAN Xiaoyan. Problems and countermeasures on sewage interception systems for rivers in Guangzhou City [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25 (2): 10-12 (in Chinese).

- [3] 郑国辉, 罗建中, 邱鸿荣. 城镇污水管网建设管理对COD减排的影响研究[J]. *给水排水*, 2010, 36(S1): 74-77.

ZHENG Guohui, LUO Jianzhong, QIU Hongrong. Research on the impact of urban sewage pipeline construction and management on COD reduction [J]. *Water and Wastewater*, 2010, 36 (S1): 74-77 (in Chinese).

- [4] 霍志华,汪传新,谢华林,等.智能拍门检测报警装置:CN111289238B[P]. 2021-12-24.

HUO Zhihua, WANG Chuanxin, XIE Hualin, *et al.* Intelligent Door Detection and Alarm Device: CN111289238B[P]. 2021-12-24 (in Chinese).

- [5] 贺军. 具有故障检测装置的电动拍门以及污水处理井:CN207567933U[P]. 2018-07-03.

HE Jun. Electric Flap Door with Fault Detection Device and Sewage Treatment Well:CN207567933U[P]. 2018-07-03 (in Chinese).

- [6] 耿梦梦,任元,樊亚洪,等. MSCSG随机误差测试及误差源分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(8): 1697-1704.

GENG Mengmeng, REN Yuan, FAN Yahong, *et al.* Random error test and error source analysis of MSCSG [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47 (8): 1697-1704 (in Chinese).

- [7] 张国校. 基于深层神经网络模型的浅层语义解析统计主要研究[D]. 广州:暨南大学, 2019.

ZHANG Guoxiao. Statistical Research on Shallow Semantic Analysis Based on Deep Neural Network Models [D]. Guangzhou: Jinan University, 2019 (in Chinese).

作者简介:姜楠(2003-),女,辽宁沈阳人,本科,主要研究方向为给排水科学与工程。

E-mail: jienengjianpai2023@163.com

收稿日期:2024-01-20

修回日期:2024-05-08

(编辑:李德强)