

引用格式:雷龙飞,李继明,李靖宇,等.一种基于电容检测的密闭管道人体掉入探测方法[J].科学技术与工程,2019,19(13):126-130
Lei Longfei, Li Jiming, Li Jingyu, et al. Method for detecting human body drop in closed pipeline based on capacitance detection[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(13): 126-130

一种基于电容检测的密闭管道人体掉入探测方法

雷龙飞¹ 李继明² 李靖宇² 程学珍^{2*}
(山东科技大学电子信息工程学院¹,电气与自动化工程学院²,青岛 266590)

摘要 为克服现有人体探测技术的局限性,提出基于电容检测的密闭管道人体掉入探测方法。首先,研究基于电容检测的人体探测方法的基本原理;其次,提出测量电路理论模型,并利用仿真验证模型的可行性;最后,设计适合现场应用的实际测量电路,搭建模拟密闭管道环境的实验平台。实验表明当人体落入密闭管道时,该测量方法能够快速有效的探测到人体。
关键词 密闭管道 人体掉入探测 相对介电常数 微小信号 检测电路 电容
中图分类号 TN98; **文献标志码** A

安全生产是中国的一项基本国策,是保护劳动者安全健康和发展生产力的重要保障,其实质是要在生产过程中防止各种事故的发生^[1,2]。为此就要在生产中排除威胁生命安全的种种隐患。在工矿企业中,密闭输送管道随处可见,由于现场的需要,大部分输送管道都有裸露部分,这些裸露部分普遍存在人员掉入的安全隐患^[3]。在发现人员掉入时采取及时有效的检测措施,是十分必要的。

现阶段对人体的探测主要有:声波探测技术^[4,5],微波式探测技术^[6,7],主动红外探测技术及被动红外探测技术等^[8-10]。声控式探测技术的抗干扰能力差,工业生产现场巨大的噪音往往会对这种技术的检测产生影响;超声波/微波式探测技术在安防上有一定应用,但是相对于空间狭小的输送管道安装这些设备比较困难;主动红外探测技术与被动红外探测技术在恶劣的工业现场透镜容易被遮挡。

针对现有各种方法的局限性,提出了一种基于电容检测的密闭管道人体落入探测方法。对该方法在煤矿刮板输送机^[11]上的应用进行了理论上的分析,并设计了实验来验证该方法的有效性。

1 基本结构与检测原理

本文提出的基于电容检测的密闭管道人体落入

探测方法的检测结构如图1所示。

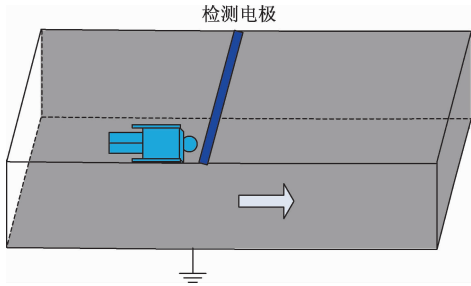


图1 人体落入检测系统结构
Fig. 1 Structure of human falling detection system

检测电极与输送管道壁分别作为检测电容的上下电容极板,输送管道壁与大地相连。在静止状态下检测电极的对地电容保持不变,当有人通过检测电极下方时,检测电极与地之间的介质的相对介电常数会发生变化,从而引起检测电极对地电容发生改变,通过检测电容量变化的特征来判断是否有人落入传输管道。

图1中所展示的是理想状态,现实中的情况往往是如图2所示。工作人员落入的经常是一个混杂了输送物质的环境,输送物质的不均匀同样会引起检测电极电容量的不规律变化,此时电容量的变化情况会较图1所示的理想情况下的复杂得多,需要通过对收集到的信号进行放大,滤波处理^[12],从中提取有益的信号特征来分辨是否有人落入传输管道。

电容的定义式为

$$c = \frac{\epsilon s}{4\pi k d} = \epsilon \mu \tag{1}$$

式(1)中, ϵ 为电容极板间介质的相对介电常数, s

2018年11月2日收到 国家自然科学基金(61503224)、山东省自然科学基金(ZR2017MF048)、山东省研究生教育质量提升计划建设项目(2016050)和青岛市民生科技计划(17-3-3-88-nsh)资助
第一作者简介:雷龙飞(1989—),男,汉族,河南安阳人,硕士研究生。E-mail:1126963370@qq.com。
*通信作者简介:程学珍(1964—),女,汉族,山东沂水人,教授,博士研究生导师。E-mail:zhenxc6411@163.com。

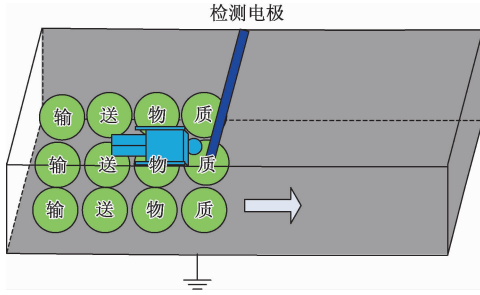


图2 输送物质与人混合模型

Fig. 2 Mixed model of transport material and human

为电容两个极板间的正对面积, k 为静电力常量, d 为电容两极板间的垂直距离。

在实际应用中传感器的探测电极是大小不变, 位置固定的。即在式(1)中, s 、 d 和 k 在传感器探测电极安装后为常量, 唯一的变量是 ε 。则式(1)可以进一步表示为

$$\mu = \frac{s}{4\pi kd} \quad (2)$$

$$c = \frac{\varepsilon s}{4\pi kd} = \varepsilon \mu \quad (3)$$

对于特定的安装环境式(3)中的 μ 为一常量。

基于电容量检测的人体探测方法, 利用式(3)所展示的原理, 电容值与电容极板间介质的相对介电常数成正比, 当人落入输送管道时介质的平均相对介电常数会发生变化。邹大军等在文献[13]中介绍了混合介质的平均相对介电常数的计算公式为

$$\sum_i q_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_e}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_e} = 0 \quad (4)$$

式(4)中, q_i 为各组分的体积分, ε_i 为各组物质自身的相对介电常数, ε_e 为混合物质的平均相对介电常数。

煤的平均相对介电常数 $\varepsilon_1 = 2.5^{[14]}$, 人体的相对介电常数 $\varepsilon_2 = 50^{[15]}$, 空气的相对介电常数 $\varepsilon_3 = 1^{[16]}$ 。假设实际生产中工人落入输送管道时所占的体积分 q_2 为 20%, 煤的体积分 q_1 为 70%, 空气的体积分 q_3 为 10%, 则由式(1)可得

$$q_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_e}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_e} + q_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_e}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_e} + q_3 \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_e}{\varepsilon_3 + 2\varepsilon_e} = 0 \quad (5)$$

$$c = \varepsilon \mu \quad (6)$$

$$c = \frac{Q}{U} \quad (7)$$

式(7)中, Q 为电容极板所带电量。

通过式(5)可得出人员误入输送管道后的探测电极与地之间混合介质的相对介电常数约为 4.6, 比人员落入输送管道前的相对介电常数约增加了

3。通过理论分析可知, 能够利用相对介电常数的明显变化作为判断人员掉入的依据。在测量电路中若保持电容两端的电压不变, 通过式(7)可知, 由于相对介电常数的改变带来的电容量的变化会造成电容电荷量的变化, 在电路中会造成电容支路的电流的变化。

2 模型与仿真

2.1 电路检测模型的建立

根据对基于电容检测的密闭管道人体落入探测方法的原理及检测方法的分析, 可以建立如图3所示的理想的电路检测模型。

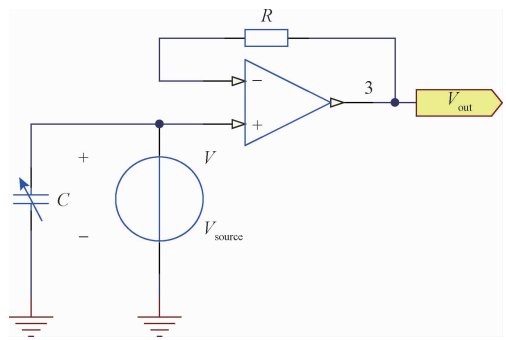


图3 电路测量模型

Fig. 3 Circuit measurement model

由式(3)可知, 电容极板间介质的相对介电常数 ε 与电容量 c 可表示为

$$c = \varepsilon \mu \quad (8)$$

在电路模型中, 由于电容 c 在 pF 量级上, 其充电时间相对于采样时间非常短, 即可以认为在每个采样时刻电容都处于饱和状态。由运放的虚短可知, 电容 c 两端的电压是恒等于 $U = V_{\text{source}}$ 的, 由电容电荷的关系式(5)和电路测量模型可推导出 ε 与输出 V_{out} 之间的关系为

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{dc}{dt} U \quad (9)$$

$$V_{\text{out}} = iR = \frac{dc}{dt} UR = \mu \frac{d\varepsilon}{dt} UR = \alpha \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (10)$$

式中, i 为检测极板的电流输出, $\alpha = \mu UR$ 。

通过以上分析可得, 相对介电常数与输出电压之间的关系可最终表示为

$$\begin{cases} V_{\text{out}} = \alpha \frac{d\varepsilon}{dt} \\ \sum_i q_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_e}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_e} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

通过测量电路理论模型的分析, 可以将测量电路输出电压的幅值变化作为是否有人落入输送管道的判断依据。

2.2 模型的仿真

参照式(5)中的初值设定,有人落入输送管道时: $q_1=0.7, q_2=0.2, q_3=0.1$;无人落入输送管道时: $q_1=0.7, q_2=0, q_3=0.3$ 。为了模拟真实环境,在煤的体积分数中加入一个幅值在 $-0.1 \sim 0.1$ 之间的噪声,在总时间 1 s 的时间内 1 000 个仿真数据点中 300~400 之间的数据点为有人落入输送管道时的模拟数据点。通过式(10)可以得到 V_{out} 的仿真波形如图 4 所示。

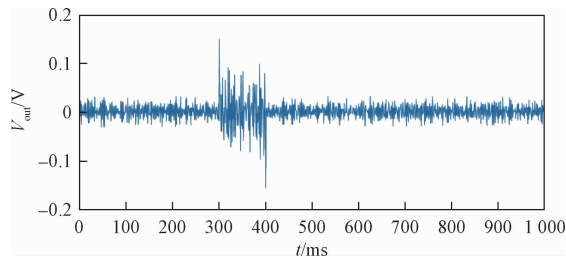


图 4 V_{out} 的仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of V_{out}

从图 4 中可以看出,当有人落入输送管道时, V_{out} 的幅度较无人落入时有明显的变化。通过仿真实验数据表明,将测量电路输出电压的幅值变化作为是否有人落入输送管道的判断方法是可行的。仿真结果也验证了该方法的有效性。

3 搭建测量电路

在测量中传感器探测电极的电流为 pA 级的微小电流信号^[17,18],为了对探测电极的微小电流信号低失真的放大,应该考虑集成运放以下参数情况:低偏置电流,较小的放大器输入电容,极大的差分输入电阻,低电流和电压噪声,高电源抑制比。

为了满足微小电流信号低失真放大,本文选用 TI 公司的集成运算放大器 OPA128K 为核心器件搭建了探测电极的前置放大器, $T_a = \pm 25^\circ\text{C}$ 时, OPA128K 的偏置电流为 $\pm 75\text{ fA}$;因为 pA 级的信号需要很大的反馈电阻做放大,所以应该选择输入差分电阻远远大于反馈电阻, OPA128K 放大器的差分输入电阻为 $10^{13}\Omega$;而输入电容的大小会对信号的带宽带来限制,所以应该选择极小的输入电容, OPA128K 放大器的输入电容为 1 pF。OPA128K 的典型噪声参数,电压 $78\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,电流 $4\text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。OPA128K 的电源抑制比典型值在 $1\text{ Hz} \sim 1\text{ MHz}$ 为 120 dB。

电流放大电路原理图如图 5 所示。

在图 5 中集成运放 U_2 、 U_3 构成了两个电压跟随器,集成运放的输入电阻为 $10^{13}\Omega$,流过的电流很小, U_2 、 U_3 可以看作是一个理想的电压源,为 U_1 提

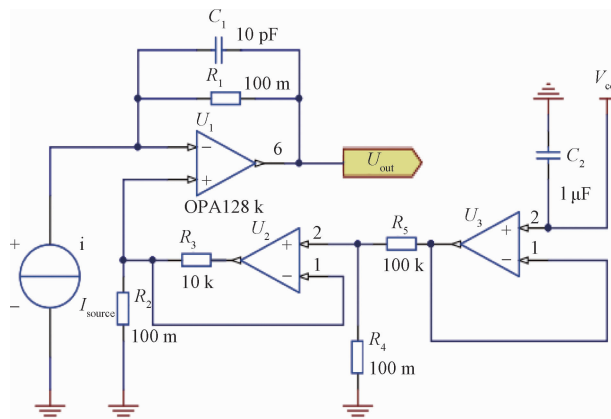


图 5 电流放大电路原理图

Fig. 5 Schematic diagram of current amplification circuit

供一个参考电压 $0.5 V_{cc}$ 。由检测原理的分析可知在电路中探测电极可以用一个电流源 I_{source} 来表示,电流为 $i(t)$ 。 U_{out} 与探测电极上的电流 $i(t)$ 之间的关系为

$$U_{out} = \frac{iR}{\frac{dc}{dt}R + 1} + 0.5 V_{cc} \quad (12)$$

4 实验验证

4.1 设计实验环境

如图 6 所示实验平台设置,实验中的探测电极材质为不锈钢材料,厚 3 mm,宽 50 mm,长 1 200 mm。考虑到煤矿的现场环境,用金属外壳模拟采矿现场的输煤管壁。实验中设置两组对比实验:A 组实验传送带上只有煤;B 组实验传送带上同时载有煤和人。

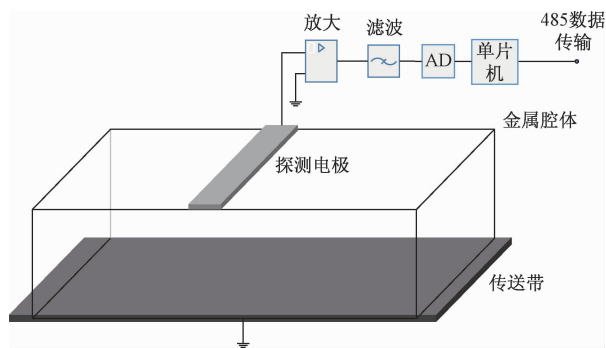


图 6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

4.2 实验结果分析

根据实验设定,需要采集 A、B 两组实验作为对比,A 组实验传送带上只有煤,B 组实验传送带上同时载有煤和人。

图 7 为 A 组实验滤波^[19]后的数据曲线图,从滤波后的信号曲线中可以看出,虽然数据幅度有波动,

但总的峰值在 $-5 \sim 5$ 之间很小的范围内。图 8 为 B 组实验中采集到的数据,在 B 组数据 3 000 ~ 3 600 范围内刚好为人从感应电极下经过。从 B 组数据的波形来看,当人经过感应电极时信号的波动幅度明显比没有人从感应电极下经过时的波动幅度大。在提取数据特征时可以将信号的峰值作为是否有人落入输送管道的判断依据。

B 组实验得到的数据波形与理论分析中电路模型得到的模拟信号波形很好的吻合,这也验证了对基于容量的人体探测方法建立的电路模型的正确性。在实验中数据的采样率为 1 kHz,传送带的平均速度为 3 m/s^[20],人的身高为 1.7 m,则当人落入输送管道中时,约有 0.6 s 的时间通过检测探头,在这期间会与约 600 个数据点被记录。从图 8 中可以看到,从这 600 个数据点中完全可以根据前 300 个数据点很好判断出是否有人落入输送管道,即在 0.3 s 的时间内检测系统是否有人落入输送管道。

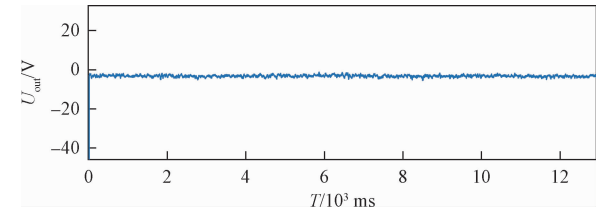


图 7 A 组实验的数据
Fig. 7 Data of group A experiment

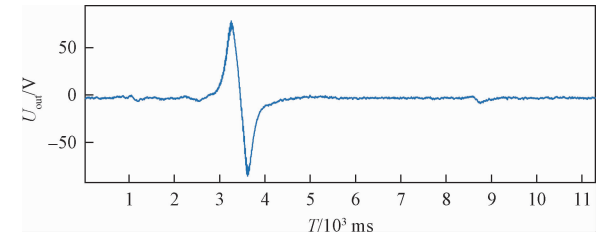


图 8 B 组实验的数据
Fig. 8 Data of group B experiment

5 结论

提出了一种基于电容检测的密闭管道人体落入探测方法,得出如下结论。

(1) 当人落入密闭输煤管道内所引起的电容量的变化是明显且可以作为判断是否有人落入的判断参数的。

(2) 通过理论分析相对介电常数的变化,结合提出的测量电路模型,得出了电路输出信号的幅值变化可作为判断是否有人落入输送管道的方法。

(3) 建立了实际测量电路模型,分析了影响微小电流信号低失真放大的集成运放的一些重要参数,完成了集成运算放大器的选型,设计了电流放大

电路。

(4) 搭建了实验平台,完成了信号采集,通过对比实验实际信号与理论模型中的信号波形的特征,得出了实验与理论一致的结论,验证了方法的有效性。

参 考 文 献

1 王国法, 庞义辉, 任怀伟, 等. 煤炭安全高效综采理论、技术与装备的创新和实践[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 903-913
Wang Guofa, Pang Yihui, Ren Huaiwei, et al. Coal safe and efficient mining theory, technology and equipment innovation practice [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 903-913

2 史秦甫, 刘秀磊, 刘旭红, 等. 煤矿安全本体研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(3): 42-49
Shi Qinpu, Liu Xiulei, Liu Xuhong, et al. Research on coal mine safety ontology[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(3): 42-49

3 刘希军, 冯秋登, 王保华. 刮板输送机常见故障及其预防[J]. 中国煤炭, 2008, 34(6): 66-67
Liu Xijun, Feng Qiudeng, Wang Baohua. Common failures and prevention of scraper conveyor[J]. China Coal, 2008, 34(6): 66-67

4 李玉星, 刘翠伟. 基于声波的输气管道泄漏监测技术研究进展[J]. 科学通报, 2017, 9(7): 650-658
Li Yuxing, Liu Cuiwei. Advances in leak detection and location based on acoustic wave for gas pipelines[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 9(7): 650-658

5 蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 分布式光纤声波传感技术研究进展[J]. 应用科学学报, 2018, 36(1): 41-58
Cai Haiwen, Ye Qing, Wang Zhaoyong, et al. Progress in research of distributed fiber acoustic sensing techniques[J]. Journal of Applied Sciences, 2018, 36(1): 41-58

6 Yan H, Liao X, Chen C, et al. An integrated microwave detector based on MEMS technology for X-band application[J]. IEEE Electron Device Letters, 2018, 39(5): 742-745

7 周正干, 孙广开. 先进超声检测技术的研究应用进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 1-10
Zhou Zhenggan, Sun Guangkai. New progress of the study and application of advanced ultrasonic testing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 1-10

8 吕事桂, 刘学业. 红外热像检测技术的发展和研究现状[J]. 红外技术, 2018, 40(3): 214-219
Lü Shigui, Liu Xueye. Development and research status of infrared thermal imaging detection technology[J]. Infrared Technology, 2018(3): 214-219

9 Ma R, Hu F, Hao Q. Active compressive sensing via pyroelectric infrared sensor for human situation recognition[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2017, 47(12): 3340-3350

10 宋燕星, 高琴, 姚振静, 等. 主动红外探测式视觉生命探测系统[J]. 红外技术, 2012(9): 521-524
Song Yanxing, Gao Qin, Yao Zhenjing, et al. Visual detection system with active infrared detection method[J]. Infrared Technology, 2012(9): 521-524

11 Lu E, Li W, Yang X, et al. Composite sliding mode control of a permanent magnet direct-driven system for a mining scraper conveyor

- [J]. IEEE Access, 2017, 5: 22399-22408
- 12 Li J M, Ma X Y, Zhao M, et al. A novel MFDFA algorithm and its application to analysis of harmonic multifractal features[J]. Electronics, 2019, 8(2): 209
- 13 邹大军, 李锡文, 张嘉琪, 等. 一种粉末相对介电常数测试方法与装置的研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 368-373
Zou Dajun, Li Xiwen, Zhang Jiaqi, et al. Study on a testing method and device for powder relative dielectric constant[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2): 368-373
- 14 Liu S, Zhang Y, Tuo K, et al. Structure, electrical conductivity, and dielectric properties of semi-coke derived from microwave-pyrolyzed low-rank coal[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 178: 139-147
- 15 Kurup D, Joseph W, Vermeeren G, et al. In-body path loss model for homogeneous human tissues[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(3): 556-564
- 16 崔丽琴, 秦建敏, 韩光毅, 等. 基于空气、冰与水相对介电常数差异的电容感应式冰厚传感器[J]. 传感技术学报, 2013, 26(1): 38-42
Cui Liqin, Qin Jianmin, Han Guangyi, et al. Capacitance inducing ice thickness sensor based on the relative permittivity difference of the air, ice and water[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(1): 38-42
- 17 朱 婷, 朱大中. 用于细胞外电信号测量的 CMOS 集成生物传感芯片的研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(4): 941-946
Zhu Ting, Zhu Dazhong. Research of CMOS integrated biosensor for extracellular bioelectrical signal recording[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(4): 941-946
- 18 詹振海, 韩念琛, 蒋文强, 等. 基于频率特性的平行板电容式土壤水检测研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(21): 222-227
Zhan Zhenhai, Han Nianchen, Jiang Wenqiang, et al. Study on capacitance soil water detection of parallel plate based on frequency characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(21): 222-227
- 19 文常保, 高丽红, 方吉善, 等. 基于改进型限幅平均滤波法的高精度称重系统研究[J]. 传感技术学报, 2014(5): 649-653
Wen Changbao, Gao Lihong, Fang Jishan, et al. The high-precision weighing system based on the improved amplitude-limiting and average filtering algorithm[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014(5): 649-653
- 20 肖华明, 孙士娇, 曹连民. 矿用带式输送机新技术应用前景分析[J]. 工矿自动化, 2018(4): 34-39
Xiao Huaming, Sun Shijiao, Cao Lianmin. Application prospect analysis of new technologies of mine-used belt conveyor[J]. Industry and Mine Automation, 2018(4): 34-39

Method for Detecting Human Body Drop in Closed Pipeline Based on Capacitance Detection

LEI Long-fei¹, LI Ji-ming², LI Jing-yu², CHENG Xue-zhen^{2*}

(College of Electronic Information Engineering¹, College of Electrical Engineering and Automation²,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

[**Abstract**] In order to overcome the limitations of the existing human body detection technology, a human body drop detection method based on capacitance detection is proposed. Firstly, basic principle of human detection method based on capacitance detection was studied. Secondly, theoretical model of measurement circuit was proposed, and feasibility of the model was verified by simulation. Finally, the actual measurement circuit suitable for field applications was designed and an experimental platform to simulate a closed pipeline environment was build. Experiments have shown that this measurement method can quickly and effectively detect the human body when the human body falls into a closed pipe.

[**Key words**] closed pipeline human body drop detection relative permittivity small signal detection circuit capacitance