DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107596

洞穴滴水传感器及其相关电路的研究与设计*

周 燕[1],邓 剑[1],李顺江[2],闫相如[1],刘 宏[3]
(1. 云南大学 信息学院 昆明 650091; 2. 云南兆讯科技有限责任公司 昆明 650000;
3. 云南大学 地球科学学院 昆明 650091)

摘 要:精准了解洞穴滴水水文特征是研究喀斯特包气带地下水渗透过程的基础。为了连续准确获取滴水信息,本文研究设计了一个喀斯特溶洞洞顶滴水传感器以满足喀斯特水文地质研究中的需要。研究选择压电感应方式及 PVDF 压电薄膜作为感应材料,心音传感器作为感应元件。通过对扩充感应面的结构设计进行响应性原理分析,验证了三层设计会相互干涉,产生叠加信号并取得较好的感应效果。确定了顶层感应面材料和中间层材料。经过实验室模拟和洞穴实地观测,设计了传感器内部精准尺寸。信号处理电路和嵌入式系统软硬件的研发,实现了对传感器的长时间监测和记录。洞穴实地数据记录分析表明该传感器感应高度≥20 cm,最快速率 10 滴/s,具精准、稳定、防水的优点适用于洞穴高湿度环境中并满足相关研究工作的需要。

关键词: PVDF 压电薄膜;洞穴滴水传感器;信号处理电路;嵌入式控制系统
中图分类号: TH764 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.99

Design and development of the cave dripping water sensor and its related circuit

Zhou Yan[1], Deng Jian[1], Li ShunJiang[2], Yan Xiangru[1], Liu Hong[3]
(*1. School of Information, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Yunnan Zhao Xun Technology Co., Ltd., Kunming 650000, China; 3. School of Geosciences, Yunnan University, Kunming 650091, China*)

Abstract: The accurate understanding of the hydrological characteristics of cave dripping water is the basis of studying the groundwater infiltration process in the karst vadose zone. To continuously and accurately obtain dripping water information, this paper designs a dripping water sensor of karst cave to meet the needs of karst hydrogeological study. The piezoelectric induction mode and PVDF piezoelectric film are selected as the induction material, and the heart sound sensor is used as the induction element. Through the analysis of the response principle of the structure design of the extended induction surface, it is verified that the three-layer design could interfere with each other, produce superposition signal and obtain good induction effect. The inductive surface materials of the top layer and the intermediate layer are determined. By simulation in the laboratory and field observation in cave, the precision size of the sensor is designed. The signal processing circuit, software and hardware of embedded system of the sensor are developed to realize the long time monitoring and recording. Cave field data analysis indicates that the induction height of sensor is ≥20 cm, the fastest rate of dripping water is 10 drops per second. It has advantages of precision, stability and waterproof. The sensor is suitable to high humidity cave environment and meets the needs of the related research works.

Keywords: PVDF piezoelectric film; cave dripping water sensor; signal processing circuit; embedded control system

0 引 言

在喀斯特水循环过程中,包气带,特别是表层喀斯特带是其中一个关键环节,控制着喀斯特地下水主要补给动态(Ford & Williams, 2007)[1-2]。包气带地下水补给是其内部水-土、石-气三相相互作用的结果,在洞穴内部具体表现为不同的滴水过程。这些滴水对降水补给是如何响应的?它们经历了怎样的下渗过程?这些问题的解答都需要获取连续精准的滴水滴率信息,观测结果不仅运

收稿日期:2021-03-11 Received Date: 2021-03-11
*基金项目:国家自然科学基金(41371040,41571010)项目资助

用于认识和量化包气带和表层喀斯特带含水层的功能与作用相关研究,还有助于人们有效管理利用喀斯特地下水的能力。同时,也可用于现代次生化学沉积过程等石笋古气候记录研究领域[3]。

要精确获取滴水数据,设计和研发一款高精度的洞顶滴水传感器至关重要。需要解决的关键技术问题包括:感应方式和感应材料的研究确定,滴水感应面积扩充结构设计及传感器精准尺寸的进一步研究,信号处理电路的研究设计及嵌入式控制系统的软硬件研究,通过模拟及野外实验检测传感器的精度。论文将针对以上关键技术问题的研究解决方法进行论述。

1　洞穴滴水传感器的研究与设计

1.1　感应方式和感应材料的研究设计

对洞顶滴水进行监测,选择一种合适的感应方式尤为重要。研究进行了 3 种感应方式的分析,分别是电阻式感应、音频式感应和压电式感应[4]。其中,压电式感应利用的压电材料大多具有防潮湿、耐腐蚀、体积小的特性,适用于野外洞穴环境中。3 种常见的压电材料的的性能参数,如下表 1 所示。表中可以看出,聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)具有较高的压电应力常数,能够满足高灵敏度要求[5-6]。其次,PVDF 聚合物具有低密度、重量轻、柔软及耐腐蚀的特点[7-9]。结合喀斯特溶洞使用环境,最终选择 PVDF 聚合物作为洞顶滴水传感器的压电感应材料。

表 1　3 种压电材料的性能参数

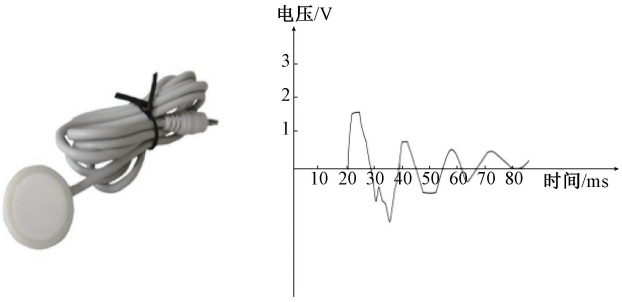
Table 1　Performance parameters of three piezoelectric materials

名称	密度/10^3·kg·m^{-3}	相对介电常数	压电应变常数/10^{-12} C·N^{-1}	压电应力常数/10^{-3} V·m·N^{-1}
钛钡酸	5.7	1 700	78	5
石英	2.65	4.6	2	50
PVDF	1.78	6.2	20~30	174~260

1.2　感应器的研究确定

为了提高效率,需要选择一款带 PVDF 压电薄膜的成品感应器。HKY-06B 型心音传感器是一款带 PVDF 压电薄膜经过多年应用发展的成熟传感器,其实物外形参看图 1(a),分析该传感器的工作参数表及其工作方式,得出具有 3 大性能特点:1)低频响应效果非常好,工作参数为 1~600 HZ,通过实验测试,频率越低其响应信号更加稳定,频响下限范围基本不受限制。2)灵敏度极高,可以达到 4 mV/Pa,输出信号幅度为 0.5~1.5 V[10]。3)感应方式是通过胸部振动引起 PVDF 压电膜的形变而产生感应信号。

依据以上心音传感器的工作参数特点,对比分析洞顶滴水参数变化和感应如下:1)频响范围:要求监测的水滴最快滴速为 10 滴/s,大于此滴速视为水滴连滴不予考虑。最慢滴速为 5~6 min 1 滴,甚至更慢。超低频段部分感应更加稳定,所以只需考虑水滴频率变化<10 Hz 的上限范围,处于心音传感器的低频段工作范围。通过示波器观测,低频段部分感应信号更加稳定,如图 1(b)所示,为某一水滴感应波形,标尺为垂直方向 1 V,水平方向 10 ms。2)感应方式:当水滴滴落到某一薄膜面时会产生微小撞击力而引起薄膜形变,再将该薄膜贴紧心音传感器的 PVDF 膜,很类似人体肌肤或胸腔,该撞击力和形变的大小随水滴高度的增加而增大。3)感应灵敏度:该传感器灵敏度较高,可达到 4 mV/Pa。当滴水点为 15 cm 高度时,用示波器观测到单向输出 4 mV,双向输出 8 mV,如图 1(b)所示。洞穴大多数滴水点高度在 50~100 cm 以上,能够产生足够幅度的感应信号。此后还将经过信号处理放大电路,足以获取水滴滴落时的感应信号。同时具有较好的防水性,由此,研究选择的感应器为 HKY-06B 型心音传感器。



(a) HKY-06B型心音传感器　　(b) 水滴感应信号

(a) HKY-06B heart sound sensor　　(b) Inductive signal of dripping water

图 1　心音传感器及水滴感应信号

Fig. 1　Heart sound sensor and inductive signal of dripping water

1.3　面积扩大响应原理分析

在环境复杂的喀斯特洞穴中,因为滴水点高度参差不齐,会有低至几十厘米和高达十几米甚至更高的滴水点,由于气流等因素的影响,使得洞顶滴水落点的位置会产生一定的漂移。心音传感器直径仅有 23 mm,如果直接用其感应洞顶滴水滴落,过小的感应面积将不能满足高滴水点产生漂移的感应需求。由此,必须在心音传感器的基础上扩充感应面积,同时保证该传感器具有较好的感应精度。

近年来多层结构的 PVDF 压电薄膜被用于共鸣器[11]和混合隔振器[12]的设计中,这证明了 PVDF 压电薄膜多层结构间的能量是可以传递的,为多层结构的洞顶滴水传感器设计提供了可能。在心音传感器基础上扩充

感应面积,首先需要设计顶层感应面,为保证在感应水滴撞击形变的同时能够将形变传递到 PVDF 膜,应该选择可变形薄膜作为感应面材料。考虑到心音传感器的 PVDF 膜对人体肌肤具有较好的感应效果,由此在顶层感应面和心音传感器 PVDF 膜之间设计一层棉质材料,同时紧密贴合上下两层,如图 2 所示。

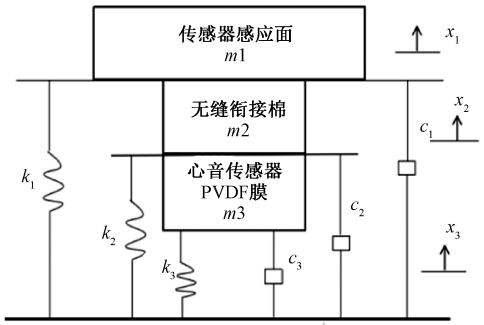


图 2 理想条件下传感器感应 3 层结构示意图

Fig. 2 Three-layer structure of the sensor under ideal conditions

可以将这 3 层结构简化为 3 个单自由度的震动系统[13-14],在 3 层感应单元制作理想的情况下,各单元紧密贴合,其中 m_1、m_2 和 m_3 分别为感应单元的质量,定为 kg;c_1、c_2 和 c_3 为粘性阻尼系数,单位为 kg·s/m;k_1、k_2 和 k_3 为弹性刚度,单位为 N/m;x_1、x_2 和 x_3 为位移,单位为 m。

在感应过程中各层的运动速度不大,可认为阻力与运动速度的一次方成正比。在理想状况中,各层感应单元在自然静止条件下也紧密连接;在施加碰撞后,各层单元同步震动,此时运动微分方程为:

$$m_1\ddot{x}_1 + m_2\ddot{x}_2 + m_3\ddot{x}_3 + c_1\dot{x}_1 + c_2\dot{x}_2 + c_3\dot{x}_3 + k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 = 0 \tag{1}$$

由于各层单元同步震动,可以认为它们的位移距离相同,即 $x_1 = x_2 = x_3$,故方程可以简化为:

$$(m_1 + m_2 + m_3)\ddot{x}_1 + (c_1 + c_2 + c_3)\dot{x}_1 + (k_1 + k_2 + k_3)x_1 = 0 \tag{2}$$

上式为一阶线性阻尼系统的运动公式,可设通解 $x_1 = Ae^{st}$ 得到其特性方程及其两个根:

$$s^2 + 2\zeta ps + p^2 = 0 \tag{3}$$

$$s_2, s_2 = (-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})p \tag{4}$$

其中阻尼 ζ 和固有频率 p 分别为:

$$\zeta = \frac{c_1 + c_2 + c_3}{2\sqrt{(m_1 + m_2 + m_3)(k_1 + k_2 + k_3)}} \tag{5}$$

$$p = \sqrt{\frac{k_1 + k_2 + k_3}{m_1 + m_2 + m_3}} \tag{6}$$

由此得出不同情况下,各层感应单元共同响应公式如表 2 所示,其中 $q = \sqrt{1 - \zeta^2}p$ 为角频率,A 为振幅,φ 为初相角。

表 2 共同响应公式

Table 2 Common response formula

欠阻尼 ($0 < \zeta < 1$)	过阻尼($\zeta > 1$)	临界阻尼($\zeta = 1$)
$x_1(t) = x_2(t) = x_3(t) = Ae^{-\zeta pt}\sin(qt + \varphi)$	$x_1(t) = x_2(t) = x_3(t) = Ae^{s_1t} + Be^{s_2t}$	$x_1(t) = x_2(t) = x_3(t) = (A + Bt)e^{-pt}$

分析表中 3 种响应公式,只有欠阻尼状态能够产生波动,此时,方能将水滴滴落撞击引起的变形和波动传递到 PVDF 膜。同时,还要求引起波动之后能够快速衰减回复到平衡状态,以至于可以感应下一水滴。因此得出结论,传感器将工作在接近临界阻尼的欠阻尼的状态,选择合适材料的质量、粘性阻尼和弹性刚度,便可满足该计算式。同时验证了 3 层结构设计产生共同响应的可行性。由此,图 2 中感应面和衔接棉必须选择弹性刚度系数小易变形的材料。其中,感应面要考虑防水,选择厚度适合的塑料薄膜,通过厚度的调整改变阻尼系数 C,保证快速回复初始状态以备感应下一水滴。同理,无缝衔接棉除考虑可振动变形性,还应选择相对较大的阻尼系数 C 的材料,使其能快速回复初始状态,由此选择珍珠棉比海绵更符合要求。通过原理分析确定了感应面和衔接棉的材料选择,其厚度尺寸将通过实验室模拟实验观测数据进一步确定。

1.4 洞穴滴水传感器结构设计

依据上述推导和实验分析,对洞顶滴水传感器进行如下设计,结构组成如图 3 所示,对各部件的研制方法论述如下:部件 1. 传感器感应面:用于扩大传感器的感应面积,接触并感应水滴滴落的撞击力,将产生的振动和形变通过共同振动方式传递给部件 2 和 3。它采用塑料薄膜材料制成形状为半径 7 cm,厚度约 0.5 mm 的圆形盘片,紧贴在部件 6 的边缘位置;部件 2. 无缝衔接棉:贴合部件 1 和 3,使得部件 1、2 和 3 之间缝隙减到最小,有利于感应水滴滴落撞击时,1、2、3 同时产生振动。它采用珍珠棉制成厚度约 2 mm,半径等同于心音传感器的圆形盘片;部件 3. 心音传感器的 PVDF 膜:位于心音传感器的顶部,水滴滴落时,通过 3 层结构的振动和形变,使得该 PVDF 膜产生压电效应,电信号经内部电路简单处理,由心音传感器信号线输出;部件 4. 心音传感器底座:用于固定 PVDF 感应膜的硬质塑料底座,内置简单处理电路,底座电缆线内有 3 根信号线分别为输入的电源线和地线及输出的感应信号线。部件 5. 硬质支撑座:用于支撑以上 1、2、3、4 部件,并满足 1、2、3、4、5 部件的高度总和与外

壳内高值相等。值得注意的是该支撑座应选择刚度较大的硬质材料,使得水滴滴落的振动和形变完全作用在部件123 上。部件 5 选择了轻便易于加工的有机玻璃,制作成厚度 0.95 cm,半径 3.5 cm 的圆形盘座。部件 6. 滴水传感器外壳:用于支撑滴水感应面,并把以上部件固定在其中,进一步提高防水性和保护性;部件 7. 倾斜支撑架:感应面平放将导致积水,会影响下一水滴的感应灵敏度,传感器感应面的倾斜可以使滴落的水滴快速流走,但同时会带来对水滴垂直撞击力的分解,经过反复测试,倾斜角以 30°为最佳。

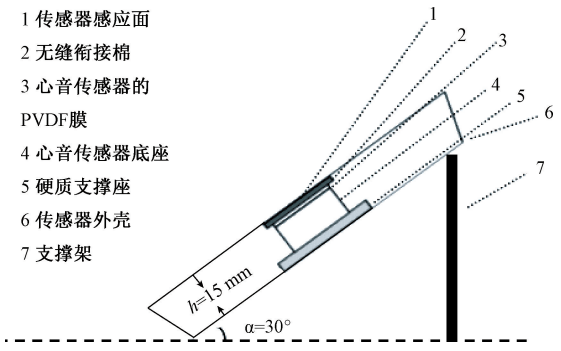


图 3　洞顶滴水传感器结构示意图

Fig. 3　Structural diagram of the water drop sensor at the top of tunnel

1.5　滴水传感器关键部件精准尺寸的研究设计

传感器主要部件精准尺寸的确定,主要是通过实验室实地模拟实验,对传感器感应面的不同点进行感应测试并将观测数据进行比较分析,选择获取最优的感应效果并以此确定部件的精确尺寸。

1)感应面面积尺寸设计

在洞穴中滴水点距离地面的高度和水滴的大小是千差万别的,同时在下落的过程中还受到气流的影响,这导致水滴在下落的过程中会产生偏移,这要求我们尽量扩大感应面面积。然而,经过实地观察发现,在一块很小的区域内可能存在多个滴水点,一个传感器只能感应一个滴水点,这又导致感应面面积不宜过大。基于研究人员长期利用漏斗和样品瓶实地取样的经验,将感应面设计为圆形,其漏斗半径通常为 50 mm,考虑到传感器外壳对感应面边缘的固定支撑作用,边缘部分不产生波动或振动很小,需在边缘预留 10 mm 的宽度,故感应面设计为半径 60 mm 的圆形,参看图 3 部件 1 和 6。

2)无缝衔接棉尺寸设计

首先对滴水感应信号的度量方式进行说明。参看图 4,其中 F 表示主波幅度,H 表示主波时间宽度,L 表示信号趋于衰减完毕的时间宽度。其中,主波幅度 F 及主波时间宽度 H 越大,说明感应效果越好,将有利于后续感应信号的处理和提取。而波形持续衰减时间 L 以短为好,研究要求感应的最快滴速为 10 滴/s,因此要求 L 必须小于 100 ms,才能不影响下一水滴感应。

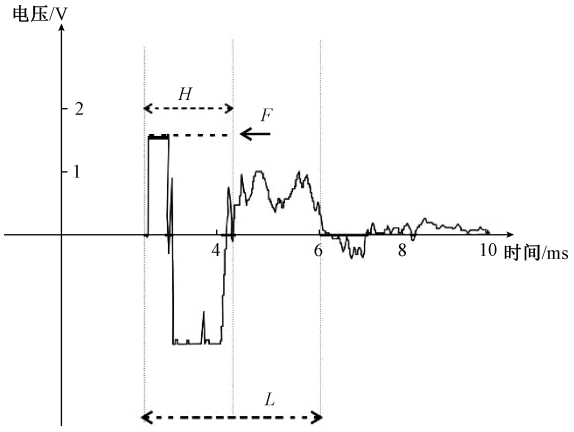


图 4　示波器监测滴水高度 1 m 时的感应信号

Fig. 4　The inductive signal of dripping water with a height of 1 m, which monitored by oscilloscope

测试选择传感器感应面上 3 个范围位置进行感应信号的多点测试。如图 5 所示,分别为:1)圆心周围 1 cm 处范围 C,2)离圆心 3 cm 处圆周位置 B,3)离圆心 5 cm 处圆周位置 A。对以上每一个位置分别取 10 个不同点进行测试,测量每个点的 $F\backslash H\backslash L$ 值,再计算出 10 个点的 $F\backslash H\backslash L$ 平均值。测量过程中,滴水点距离传感器高度保持不变,固定为 30 cm,以此保证相同的撞击力。如表 3 所示,为 3 种不同衔接棉情况的测量平均值。

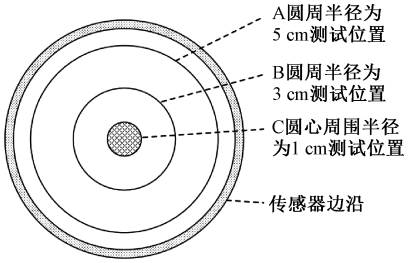


图 5　洞顶滴水传感器感应面顶视图

Fig. 5　Top view of the dripping water sensor's sensing surface

表 3　不同衔接棉厚度对应水滴感应信号的测量平均值

Table 3　The measured mean values of dripping water sensing signal corresponding to different connecting cotton thickness

无缝衔接棉材料	A 圆周($F\backslash H\backslash L$)测量平均值	B 圆周($F\backslash H\backslash L$)测量平均值	C 圆心周围($F\backslash H\backslash L$)平均值
无珍珠棉	0.5 v/1 ms/12 ms	0.3 v/0.5 ms/5 ms	0.5 v/1.5 ms/2 ms
1 mm 珍珠棉	0.6 v/1.6 ms/6 ms	0.6 v/1.5 ms/3 ms	0.6 v/1.3 ms/3 ms
2 mm 珍珠棉	0.6 v/1.2 ms/5 ms	0.5 v/0.8 ms/5 ms	0.5 v/0.8 ms/3 ms

分析表 3 数据,无珍珠棉的情况下主波幅度 F,尤其是主波时间宽度 H 较有珍珠棉的情况有较大程度减小,特别是在 A,B 圆周位置更为明显,说明无珍珠棉的情况下感应到的主波信号弱很多,同时验证了 3 层结构共同振动响应原理和珍珠棉的上下无缝贴合对传递形变到 PVDF 膜的有效性。此后分别 1 mm 和 2 mm 对厚度珍珠棉作为衔接棉的传感器 ABC 3 位置进行测量,1 mm 珍珠棉的主波幅度和宽度比较 2 mm 珍珠棉的主波幅度和宽度在 ABC 3 个位置都有非常明显的增强,说明 1 mm 厚度比 2 mm 厚度的感应效果好,分析原因是 2 mm 厚度珍珠棉由于有更大阻尼系数 C 而影响振动的传递。再查看 1 mm 厚度的 L 值,完全满足最快感应 10 滴/s 即 L<100 ms 衰减时间要求,最终确定 1 mm 厚珍珠棉作为衔接棉。

3)感应面厚度尺寸设计

上述原理分析确定了感应面材料为塑料膜,本节将对不同厚度的塑料膜进行感应信号测试,选择最佳效果的感应膜厚度。

表 4 数据第 1~4 行,是将滴水点高度固定为常见 1 m 高度,代表相同撞击力,对塑料膜进行 0.1~0.4 mm 4 种不同厚度的感应测试,测试点位置如图 5 所示,每一种厚度的塑料膜分别在 ABC 3 个位置范围选择 10 个点进行波形测量,计算出 3 个位置平均值。波形的度量方式与上一小节相同。其中,感应幅值参看表 3 中 30 cm 高度 1 mm 厚度珍珠棉测量的 F 值,经过后续的信号处理放大电路完全能够提取滴水信号,充分显示出心音传感器的高灵敏度。当高度增至 1 m 时,信号幅度达到峰值如图 4 所示。由此,表 4 中数据便不对幅值进行比较。分析主波宽度 H 值,都处于≥7.3 MS 范围,如图 4 所示,其中纵坐标为 1 V 标格,横坐标为 10 MS 标格,至少包含两个以上峰值正向波,通过后续的信号处理电路,都能满足滴水信号的提取。既然主波强度都能达到要求,则决定感应面厚度的参数就应该取决于衰减时间 L。依据原理推导结论,在保证振动形变传递即获得主波强度的前提下,衰减时间 L 以短为好,可以尽快回复初始状态以备感应下一水滴。分析表中 L 数据,分别计算每一种厚度 ABC 位置的 L 平均值,以 0.2 mm 厚度塑料膜的 L 平均值最小为 22.23 ms,完全满足 L<100 ms 的要求。所以,感应面材料选择 0.2 mm 厚度塑料薄膜,具有较好的信号主波感应强度,又能够快速衰减回复初始状态。

表 4 不同感应面厚度对应水滴感应信号的测量平均值

Table 4 Measured average value of dripping water signals corresponding to different induction surface thicknesses

感应面厚度/滴水点高度	A 圆周(H/L)测量平均值	B 圆周(H/L)测量平均值	C 圆心周围(H/L)测量平均值
0.1 mm/1 m	8.5 ms/25.3 ms	42 ms/64.4 ms	34.8 ms/53.3 ms
0.2 mm/1m	7.3 ms/19.3 ms	15.3 ms/23.8 ms	14.1 ms/23.6 ms
0.3 mm/1m	8.8 ms/16.3 ms	15.1 ms/37.0 ms	19.0 ms 31.5 ms
0.4 mm/1m	11.7 ms/29 ms	17.6 ms/37.2 ms	18.6 ms 26.3 ms

1.6 信号处理电路的研究设计

滴水传感器产生的模拟信号如图 7 所示,垂直水平标识尺寸为 1 V 与 10 ms。必须将模拟信号处理为数字脉冲信号,才能被处理器检测记录。故设计了一套信号处理电路如图 6 所示。

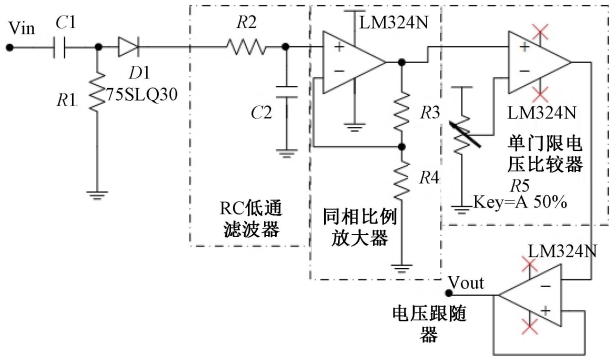


图 6 滴水传感器信号处理电路

Fig. 6 Signal processing circuit of the dripping water sensor

水滴模拟信号经过一个 47 μF 的钽电容 $C1$ 滤除其中直流部分,处理后波形在 1.5 V 电平中线上下波动,有利于后面放大处理;之后经过一个肖特基二极管 $D1$,将波形中的负电压部分去除;然后经过一个低通滤波器,滤除信号中的高频部分,减少干扰信号;此后经过一个同相比例放大电路,将信号放大;放大后的水滴信号经过电压比较器,由可变电阻选择合适的直流电平,比较后输出方波信号;此后再经过一个电压跟随器,起到阻抗匹配和隔离缓冲作用,最后将脉冲信号送达处理器[15-17]。

RC 滤波器的截止频率的计算公式为:$f=1/2\pi RC$,其中 $R2=100\ \Omega$,$C2=1\ \mu F$,可知低通滤波的截止频率为 $f_L=1\ 592.4$ Hz,可以达到较好的滤波效果。

放大电路采用同相比例放大电路,经过实验测试,考虑较低滴水点感应信号幅度最小的情况下,放大倍数设置为 2.5 倍,根据公式 $A=1+R3/R4=2.5$,有 $R3=300\ \Omega$、$R4=200\ \Omega$。

在实验室环境中模拟洞穴滴水进行电路研发实验,经过反复设计调整,得到效果如图 7 所示,垂直水平标识尺寸为 1 V 与 5 ms。可以从示波器看出每一水滴信号是一个不断波动并逐渐衰减的模拟信号,经过处理电路之后,提取了高幅值信号并生成对应的方波信号,该信号可以直接送达处理器进行识别和记录。同时处理器采取软件滤波方式,针对水滴高度和感应位置的变化,每水滴产生的多个方波信号也会变化,此时,处理器配合采取

60 ms 的软件滤波,即每水滴的第一个方波信号触发后,60 ms 内的脉冲跳变信号均为无效或被屏蔽,以保证每水滴只做一次记录。

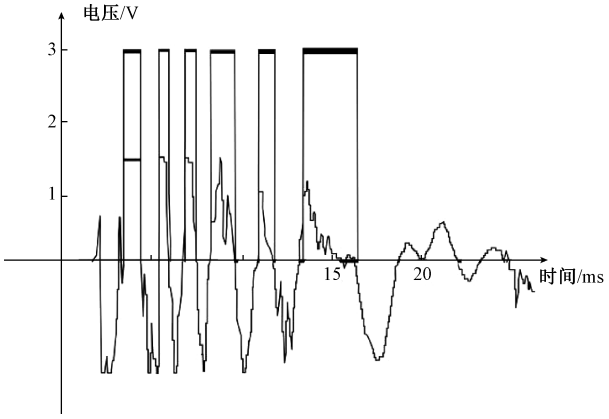
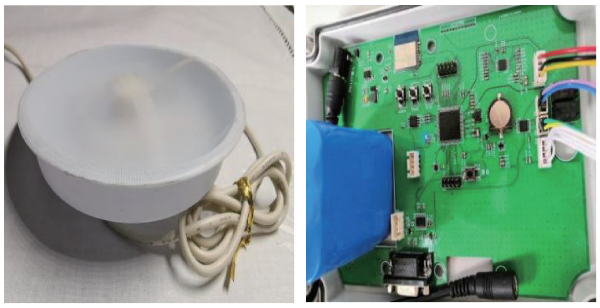


图 7　示波器监测水滴信号处理前后信号对比图

Fig. 7　Comparison of dripping water signals before and after signal processing with oscilloscope

1.7　嵌入式控制电路板的研究设计

水滴滴速的精确计算要求准确记录每一水滴滴落的时刻,并且精度要求达到到 ms 级。这就需要研究设计配套的嵌入式控制电路及控制软件,对传感器的信号进行自动记录。控制模块主要功能包括:主控制器 MCU、水滴数据检测及信号处理、数据存储功能、配置参数及获取数据通信功能、R232 串口调试功能。其中,考虑到传感器需要在洞穴长期工作,主控制器 MCU 选用 STM32L451VCT6 低功耗处理器,在待机模式下功耗不到 5 μA。数据存储器选择 SST26VF064B Flash 存储器,其待机电流为 8 μA,容量达到 64 Mbit,采用 SuperFlash 编程技术,能够保证传感器工作时间长达 21 天,记录数据多达 12 万条。通信模块选择 ESP8266 WIFI 通信模组,内置低功耗处理器,待机功耗小于 20 μA,支持实时操作系统(RTOS)。控制参数配置和水滴数据获取通过操作上位机软件完成操作。嵌入式控制电路板如图 8 所示。



(a) 水滴传感器
(a) Water drop sensor

(b) 控制电路板
(b) Control circuit board

图 8　实物图

Fig. 8　Physical picture

2　实验及结果分析

2.1　传感器感应精度测试分析

在实验室中采用点滴输液器模拟水滴的滴落,利用流速调节器控制滴速稳定在 2 s/滴。将研究设计的传感器插入嵌入式电路板的输入端口,并通过长时间的观测和记录获取大量的水滴记录数据。

记录格式如图 9 所示。其中,感应数据记录了每一水滴滴落对应的完整日期和时间,精确到 ms。由于数据量非常大,要想快速发现传感器的精准度问题难度较大。由此研究设计了水滴数据图形测试软件,简称间隔时间柱状图软件,用以测试大批量的水滴监测数据。横坐标为如图 9 所示的日期时间,纵坐标即每一柱状图高度为相邻两水滴的间隔时间。测试方法为模拟滴速固定为匀速间隔 2 s/滴,流速器控制滴速会有偏差±0.04 s。当传感器准确感应时,水滴滴落的间隔时间为 2±0.04 s,对应的柱状图如图 10 所示,高度比较均衡,少量差值为水滴滴落的实际时间差。当出现某柱状图高度为之前的两倍,说明间隔时间翻倍,表示有某一水滴被漏记的情况发生。而当某柱状图高度值有大幅变低,则说明间隔时间变短,与实际不相符,有多感应的情况发生,例如杂波干扰。所以通过柱状图的高度值,可以直观判断传感器感应是否有漏记或者多记的情况发生。该图形软件设计为左右动态滑动,方便查看大批量的水滴数据。所以通过该图形软件可以直观快速的观察出传感器的精准度工作情况。经过长时间不同滴水点高度观测和记录,除开外界干预如人为触碰,传感器感应精度较好。提取片段数据如图 9 所示,可以放置于野外进行实地进一步观测。

2019/11/05 16:37:11.561=1滴
2019/11/05 16:37:13.632=1滴
2019/11/05 16:37:15.673=1滴
2019/11/05 16:37:17.744=1滴
2019/11/05 16:37:19.785=1滴
2019/11/05 16:37:21.856=1滴
2019/11/05 16:37:23.899=1滴
2019/11/05 16:37:25.969=1滴
2019/11/05 16:37:28.009=1滴
2019/11/05 16:37:30.078=1滴
2019/11/05 16:37:32.118=1滴
2019/11/05 16:37:34.187=1滴

图 9　记录数据

Fig. 9　Record data

选择将该传感器放置在项目研究的观测点黄龙洞中,通过上位机软件设置工作参数,每 2 周获取一次数据。野外实地碰到的难点问题是洞内空气湿度较大且含

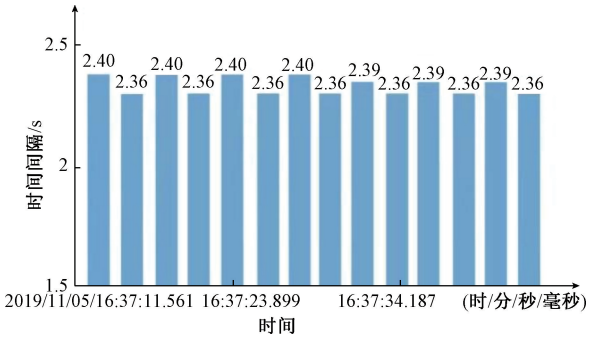


图 10 多水滴间隔时间柱状图

Fig. 10 Histogram of multi-drop interval time

有碳酸钙沉积物,曾经发生过密封盒里的电路板被腐蚀。之后采取密封盒外双层防水袋密封、接插件采用密封胶和电路板喷涂防水漆处理,使得电路板电路及元器件的防水性得到充分保证。

由于数据量较大,为方便从数据中提取信息,研究设计了水滴数据统计软件,该软件有按时段统计等功能。如图 11 所示,横坐标为日期时间,纵坐标为时段内统计的水滴总数。将时段统计值设置为 30 s,通过相同时间段内水滴总数的统计,可以看出滴速平稳或变化的情况。图 11 中可以看出 30 s 内水滴总数为 18~19 滴,对应滴速为 0.6~0.63 滴/s,通过现场实地观测,这两周该滴水点滴速为匀速,说明传感器感应和记录数据与实际情况相符合。如果要查看感兴趣的信息,可以变化调整统计时段时间值且配合前面间隔时间柱状图查看详细信息。

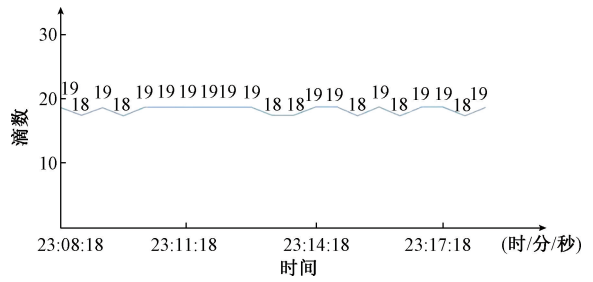


图 11 野外监测按时段统计数据

Fig. 11 Statistical data of field observation by time period

2.2 传感器感应高度测试分析

当滴水点高度增高,对传感器的撞击力随之增大,此时水滴感应信号幅度足够大,能够被可靠感应。反之,当滴水点高度逐渐降低,感应信号强度会随之减弱,因此需要对传感器感应的最低高度测试分析。选择感应面上感应信号相对较弱的位置选取测试点,通过长时间观测和原理分析可知,靠近传感器边沿位置波动变形比较弱即感应信号较弱,所以在边沿位置选择信号弱但仍然能够被感应的多个点进行测试,每个测试点测量 3 个不同高度下的感应主波幅值,依据幅值情况确定最低感应高度。测量值如表 5 所示,在滴水点距离传感器 10 cm 时,有部分水滴主波幅值偏小不能被控制器识别,而在 15 cm 的高度时,感应信号均能够被控制器识别,考虑到野外工作的可靠性,故将滴水点可靠感应高度设定为 20 cm 以上。即只要≥20 cm 高度的滴水点,都能够被传感器可靠感应。

表 5 不同高度下测试点主波幅值

Table 5 Main wave amplitude of test point at different heights

滴水点高度/cm	测试点主波幅值/V					
	1	2	3	4	5	6
10	1.51	1.32	1.41	1.45	1.54	1.47
15	1.62	1.65	1.6	1.62	1.66	1.64
20	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7

3 结 论

通过对感应方式和感应材料的研究,科学合理地选择了压电感应方式和 PVDF 薄膜感应材料,由此,选择和对比分析了心音传感器的主要特性与水滴感应的相关特性,确定了高灵敏度且具防水性的心音传感器作为核心感应器,为后续研究工作提供了较大的可行性。在传感器感应面扩充的研究设计中,首先进行了多层结构的响应分析,得出响应公式和结论:传感器采用多层设计会相互干涉,相互干扰产生叠加信号,取得较好的感应效果。分析响应公式,确定了感应面材料为塑料薄膜,衔接棉材料为珍珠棉。以响应公式为依据设计了传感器的总体结构。通过实验室模拟实验,对传感器进行多个感应点感应信号的测试分析,确定了塑料薄膜和珍珠棉的最佳厚度尺寸。

研究设计了信号处理电路和嵌入式电路板软硬件控制系统,使传感器感应信号被计算机识别和记录,存储器可记录 12 万条水滴数据,各模块进行低功耗设计可连续工作三周以上,密封盒、电路板和接插件采取了严密防水措施。解决了溶洞中高湿度环境下电子电路正常运作问题,实现了水滴可靠感应和长时间自动监测。

通过实验室模拟和溶洞实地测试,获取了大量水滴监测数据,为了高效率分析数据,研究了水滴间隔时间图形软件和水滴数据统计软件,能够快速准确地获取研究信息。通过长时间观测数据分析,得出该传感

器对水滴感应精度高,性能稳定,除外界干预外,基本没有误感应。感应高度范围≥20 cm,即高于 20 cm 的滴水点都可以被可靠监测。记录时间精度为 ms,感应最快速率为 10 滴/s。

传感器及其控制电路已应用于昆明市老黄龙洞滴水观测研究中,能获取连续精准滴水信息,还将滴速观测运用于自动取样,即根据滴速变化实现样品自动采集。总之,传感器精准度和稳定性能够满足研究工作的需要并应用于多个测试点。

参考文献

[1] FORD D, WILLIAMS P. Karst Hydrogeology and Geomorphology [M]. John Wiley, Chichester, U. K. 2007, 132-135.

[2] 庞忠和, 黄天明, 杨硕, 等. 包气带在干旱半干旱地区地下水补给研究中的应用[J]. 工程地质学报, 2018, DOI:10. 13544/j. cnki. jeg. 2018. 01. 006.
PANG ZH H, HUANG T M, YANG SH, et al. Application of vadose zone to groundwater recharge in arid and semi-arid areas [J]. Acta Engineering Geology, 2018, DOI: 10. 13544/j. cnki. jeg. 2018. 01. 006.

[3] 李婧昕, 许尔琪. 中国西南喀斯特地区正负地形的提取方法研究[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1989-1999.
LI J X, XU ER Q. Extraction method of positive and negative topography in karst area of Southwest China[J]. Resource Science, 2017, 39(10):1989-1999.

[4] 周燕, 朱家兴, 王威廉. 洞穴水滴传感器研制及其参数测试[J]. 传感器世界, 2006, 12(6):18-22.
ZHOU Y, ZHU J X, WANG W L. Development and parameter test of water drop sensor in cave [J]. Sensor World, 2006, 12 (6): 18-22.

[5] 沙永忠, 姜宏伟, 李盘文. 柔性压电传感器的设计[J]. 测控技术, 2011, 30(3):1-4.
SHA Y ZH, JIANG H W, LI P W. Design of flexible piezoelectric sensor [J]. Measurement and control technology, 2011, 30 (3): 1-4.

[6] 揭琳锋, 朱晓锋, 王国林,等. PVDF 的大拉伸变形测试机理研究[J]. 传感技术学报, 2010(6):896-898.
JIE L F, ZHU X F, WANG G L, et al. Study on the testing mechanism of large tensile deformation of PVDF [J]. Journal of sensing technology, 2010 (6): 896-898.

[7] GUZMÁN E, CUGNONI J, GMÜR T. Monitoring of composite structures using a network of integrated PVDF film transducers [J]. Smart Materials & Structures, 2015, 24(5):055017.

[8] 郭雪培, 侯晓娟, 杨玉华, 等. 基于 PVDF-TrFE 薄膜的柔性自供电传感器[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7):42-48.
GUO X P, HOU X J, YANG Y H, et al. Flexible self powered sensor based on PVDF-TrFE film [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39 (7): 42-48.

[9] 徐浩, 芮筱亭, 于海龙, 等. 弹底发射装药挤压应力测试的 PVDF 传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1029-1035.
XU H, RUI X T, YU H L, et al. Study on PVDF sensor for extrusion stress measurement of projectile bottom charge [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013,34 (5): 1029-1035.

[10] 郭军涛, 林森财, 侯开江,等. 基于 HKY06A 心音传感器的心音信号提取[J]. 中国医疗设备, 2008(3): 15-16+19.
GUO J T, LIN S C, HOU K J, et al. Heart sound signal extraction based on HKY06A heart sound sensor [J]. China Medical Equipment, 2008 (3): 15-16+19.

[11] LEE H Y, CHOI B. A multilayer PVDF composite cantilever in the Helmholtz resonator for energy harvesting from sound pressure[J]. Smart Materials & Structures, 2013, 22(11):5025.

[12] 高俊, 季宏丽, 裘进浩. 基于层叠式 PVDF 作动器的混合隔振器的设计与特性研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9):141-148.
GAO J, JI H L, QIU J H. Design and characteristics of hybrid vibration isolator based on laminated PVDF actuator [J]. Vibration and Shock, 2015, 34 (9): 141-148.

[13] 苏勋文, 王少萍, 朱冬梅, 等. 直升机中减速器谐响应分析与传感器优化布局[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(9):1049-1053.
SU X W, WANG SH P, ZHU D M, et al. Harmonic response analysis and sensor placement optimization of helicopter reducer [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37 (9): 1049-1053.

[14] 郑星, 黄海莹. 加速度传感器安装方式的理论建模与响应分析[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(11): 61-63.
ZHENG X, HUANG H Y. Theoretical modeling and response analysis of acceleration sensor installation mode [J]. Sensors and Microsystems, 2016, 35 (11):

61-63.

[15] 辛毅, 杨庆雨, 郑浩田,等. PVDF 触滑觉传感器结构及其调理电路设计[J]. 压电与声光, 2014, 36(1): 76-78,84.
XIN Y, YANG Q Y, ZHENG H T, et al. PVDF tactile sensor structure and conditioning circuit design [J]. Piezoelectric and Acoustooptic, 2014, 36 (1): 76-78, 84.

[16] 周利明, 张小超, 刘阳春, 等. 联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6):167-171.
ZHOU L M, ZHANG X CH, LIU Y CH, et al. Design and test of PVDF array sensor for grain loss measurement of combine harvester [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2010, 41 (6): 167-171.

[17] 王庆锋, 吴斌, 宋吟蔚, 等. PVDF 压电传感器信号调理电路的设计[J]. 仪器仪表学报, 2006 (S2): 1653-1655.
WANG Q F, WU B, SONG Y W, et al. Design of signal conditioning circuit for PVDF piezoelectric sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006 (S2): 1653-1655.

作者简介

周燕,1985 年于云南大学获得学士学位,现为云南大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为信号处理及嵌入式控制系统研发。
E-mail: yanzhouyn@126.com

Zhou Yan received her B. Sc. degree from Yunnan University in 1985. She is currently an associate professor and a master advisor at Yunnan University. Her main research interests include embedded control system research and development.

邓剑,2018 年与西北民族大学获得学士学位,现为云南大学在读硕士研究生,主要研究方向为信号处理及嵌入式控制系统研发。
E-mail: 546542212@qq.com

Deng Jian received his B. Sc. degree from Northwest Minzu University for in 2018. He is currently a master student at Yunnan University. His main research interests include embedded control system research and development.

李顺江,2007 年于苏州大学获得学士学位,现为云南兆讯科技有限责任公司的中级工程师,主要研究方向为配电网电场强度检测、近电预警及应用。
E-mail: 921972213@qq.com。

Li Shunjiang received his B. Sc. degree from Soochow University in 2007. He is currently an intermediate engineer at Yunnan Zhaoxun Technology Co., Ltd. His main research interests include electric field strength detection of distribution network, near power warning and its application.

刘宏(通信作者), 1985 年于西南师范学院获得学士学位,现为云南大学副研究员、硕士生导师,主要从事喀斯特水文和水文地质研究。
E-mail: hongliu@ynu.edu.cn

Liu Hong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Southwest Normal University of China in 1985. He is currently an associate research fellow and a master advisor at Yunnan University. His main research interests include karst hydrology and hydrogeology.