

# 基于压电效应的雨量与雨滴谱检测<sup>\*</sup>

朱力强, 罗婷, 蔺潇

(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京, 100044)

**摘要** 为了解决雨量及降雨微观特征同步监测的难题, 提出基于压电效应的降雨参数感知方法。首先, 利用阵列式压电换能器消除传感器的边界效应, 准确测量雨滴下落末动量, 利用标定响应函数实现雨滴粒径的测量; 其次, 提出基于电压真有效值信号的雨滴混叠识别方法, 实现雨滴数量的估计; 最后, 综合雨滴粒径和数量获得雨滴谱, 通过累加雨滴体积得到降雨量和降雨强度。数学仿真与实物实验表明, 本方案可以自动连续测量记录雨滴数量、粒径大小、降雨量和实时降雨强度等信息, 能够保证对于大雨、小雨以及降雨微观特征都具有较高的测量精度。

**关键词** 降雨测量; 降雨量; 雨滴粒径; 雨滴谱; 压电效应

**中图分类号** TH765

## 引言

降雨的测量在气象观测和分析中是非常重要的一项内容, 及时准确地获取降雨数据对监测与防治自然灾害具有重大作用。卫星云图和气象雷达等遥测方法可以实现大范围降水的遥感和遥测, 但是对于小范围实时地面降水观测并不适用。小范围监测一般采用地面观测设备, 常用的有雨量筒和翻斗式雨量计等, 其测量精度高、测量结果可靠, 但也存在响应时间长、承水口易被杂物堵塞等缺点。另外, 这些设备也不具备降雨微观特征的测量能力<sup>[1]</sup>。其他基于光学法<sup>[2]</sup>、摄像法<sup>[3]</sup>的降雨地面测量科学仪器具备不同程度的降水特征测量能力, 但由于光学镜头成本昂贵且易受灰尘、雾霭和霜露等因素的影响, 难以在长期无人值守的野外环境中应用<sup>[4]</sup>。基于动力学方法的降雨测量方法是通过测量不同大小雨滴下落的冲击力, 从而间接测得雨滴的粒径大小。现有的基于动力学方法的降雨测量仪器, 按测量原理分为磁电式<sup>[5]</sup>和压电式<sup>[6]</sup>两种。基于磁电式原理的降雨测量仪器重量大、功耗大、成本高, 不适合大批量的工程应用。压电式降雨测量仪器具有功耗低、成本低、体积和重量小、测量实时性好及自动化程度高等优点, 具有较广泛的应用前景。

现有的压电式降雨测量仪器存在的主要问题是难以保证对于大雨、小雨以及降雨微观特征都具有

较高的测量精度<sup>[7]</sup>。例如, 压电式雨量传感器无法在整个传感区域都获得均匀的振动响应, 引起单个雨滴测量的误差; 传感器灵敏度不足, 难以精确测量较小雨滴的尺寸; 在大降雨强度的测量中, 短时间间隔采集到的两个雨滴信号易发生混叠, 引起测量误差<sup>[8]</sup>。针对现有测量方法存在的局限, 笔者提出采用多个压电传感元件并联构成阵列<sup>[9]</sup>, 使传感区域获得较为均匀的振动响应, 来减小边界效应对测量的影响。采用不同放大倍数的两路信号并行处理分析的方法, 保证足够的量程和分辨率来兼顾大小雨滴的测量, 同时保持了电路的简单可靠。使用硬件均方根(root mean square, 简称 RMS) 转换方法将压电传感元件输出的振动脉冲信号转换为直流电压信号, 在低采样率的条件下提高连续短间隔连续雨滴的分辨率, 减小信号混叠的影响。

## 1 雨量粒径测量

### 1.1 测量原理

图 1 为压电传感元件测量雨滴粒径原理图。压电传感元件测量雨滴粒径的方法如图 1(a) 所示, 通过测量雨滴下落的动量来间接估计雨滴的粒径大小。雨量传感器由金属壳体和粘贴在金属壳体内部的压电传感元件 2 部分组成。当雨滴撞击金属壳体时会引起传感器产生微小的机械振动, 压电元件在

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200401)  
收稿日期: 2019-04-04; 修回日期: 2019-06-27

振动时由于机械应力的作用,会在电极之间产生电压差,对外输出电信号。雨滴撞击的冲击力越大,则振动幅值越大,传感元件输出电压的幅值也越大。因此,可以通过采集压电元件输出信号得到雨滴对传感器表面的冲击力来间接测量雨滴下落动量。当雨滴速度已知时,可以得到雨滴粒径的大小。

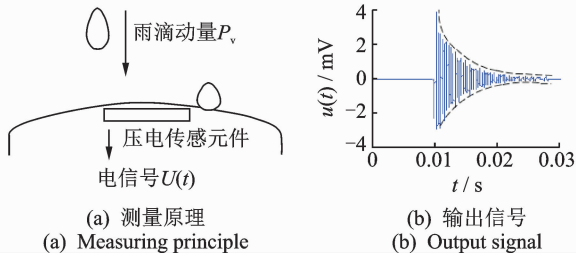


图1 压电传感元件测量雨滴粒径原理图

Fig. 1 Principle of raindrop size measurement

雨滴在降落过程中由于受到空气阻力,随着速度的增加,加速度会逐渐减小,最终达到雨滴的落地终速<sup>[10]</sup>。根据 Gossard 模型<sup>[11]</sup>,雨滴的垂向下落终速(标准大气条件下)为

$$V_t = 9.65[1.0 - \exp(-0.53D_{eq})] \quad (1)$$

其中: $D_{eq}$ 为等效直径。

忽略通常情况下很小的垂向风速,则垂直动量只与雨滴的质量和下落终速相关

$$p_v = mV_t \quad (2)$$

其中: $m$ 为雨滴质量; $V_t$ 为垂向雨滴终速。

雨滴冲击传感器表面产生机械振动,压电传感元件将振动转换为电信号输出。每个雨滴对应的输出信号为振幅指数衰减的正弦信号,如图1(b)所示,输出电压在发生撞击后迅速达到最大值,峰值电压为

$$U_m = cp_v = cmV_t = \frac{1}{6}\pi\rho cV_t D_{eq}^2 \quad (3)$$

其中: $c$ 为常数,由传感器表面材料刚度及压电材料的压电系数等因素决定<sup>[12]</sup>; $\rho$ 为雨水的密度。

由式(1)可知,雨滴终速 $V_t$ 与雨滴粒径 $D_{eq}$ 正相关。因此,可通过采集每个压电元件输出脉冲的峰值电压来计算对应雨滴的粒径和体积,由式(1)和式(3)可得峰值电压的计算公式为

$$U_m = 5.05\rho c[1.0 - \exp(-0.53D_{eq})]D_{eq}^2 \quad (4)$$

由式(4)可知,当 $\rho, c$ 都为常量时,传感器输出脉冲的峰值电压只与采集雨滴的等效直径 $D_{eq}$ 相关,因此可以测得雨滴的粒径和体积大小。

## 1.2 边界效应的去除

由于传感器外壳的结构和支撑的影响,其输出

信号的边界效应是不可避免的。为获得边界效应的影响规律,可以通过实验控制相同高度下落单个雨滴粒子撞击传感器的不同位置,得到传感器不同位置的机电转换系数分布 $c(r)$ 函数。其中, $r$ 为雨滴撞击位置据传感器中心的距离。设雨滴落在传感器各个位置的概率相同,则可以计算得到有效传感面积内的平均机电转换系数

$$\bar{c} = \frac{\int_0^R 2\pi r c(r) dr}{\pi R^2} \quad (5)$$

本研究的传感器传感区域半径 $R = 60 \text{ mm}$ 。当采用如图2(a)所示的传感器结构,只在中心位置粘贴一个压电片时,传感器的归一化机电转换系数分布 $c(r)$ 如图2(b)所示。可以看出,粒子落在边缘的输出电压只有相同动量的粒子落在中心时输出电压的一半,在单个雨滴的测量中会引起很大误差,单个雨滴粒径测量相对误差为20.1%。为消除边界效应,采用多个压电片直接接收不同位置雨滴的激励信号,同时还需要优化压电片的分布来获得一致的振动响应。经过多种分布方案的对比,笔者提出采用如图2(c)所示的多个压电片并联结构,传感器中心位置空出,只在周边区域均匀粘贴。这种压电片分布方式可以降低中心区域的灵敏度,有效减小边界效应对单个雨滴测量结果的影响。此时传感器的归一化机电转换系数分布 $c(r)$ 如图2(d)所示,单个雨滴粒径的测量相对误差可以减小到10.2%。

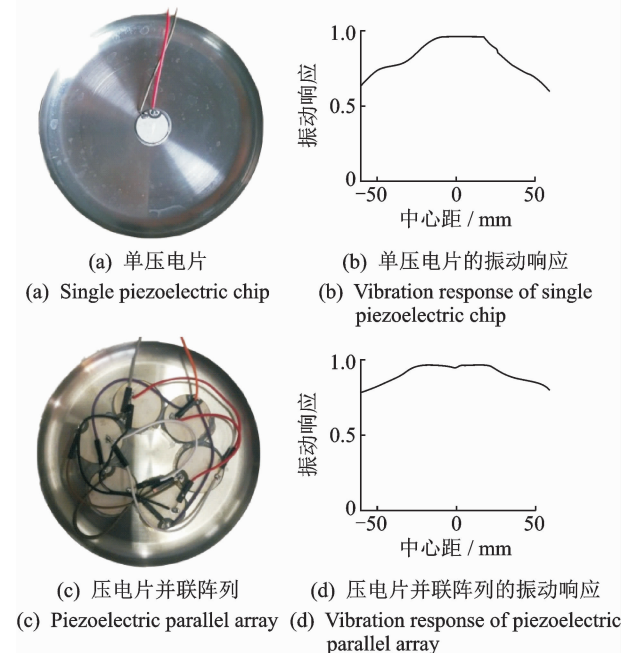


图2 传感器边界效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of boundary effect of sensor

## 2 雨滴数量的测量

边界效应会带来雨滴直径估计误差,当两个雨滴之间的时间间隔较短时,会使前后两个雨滴在压电传感器的输出信号产生混叠而相互干扰,导致一部分雨滴信息被其他雨滴覆盖,造成雨滴数目的低估。如图1(b)所示的单个雨滴传感器输出信号,脉冲信号的脉宽大致为 $\tau=10$  ms,通常情况下一个雨滴的信号脉宽不会超过20 ms。当传感器采集到下落时间间隔小于 $\tau$ 的两个雨滴,此时会出现第1个雨滴激励的振动信号还没有衰减,接下来的雨滴已经产生了新的振动的情况,使前一个雨滴覆盖第2个雨滴的信号,引起测量误差。

### 2.1 重叠雨滴的辨识方法

图3为不同大小雨滴连续激励仿真信号,其中:红色星号的时间轴位置表示前后相邻两个雨滴出现的时刻。由于压电元件输出信号为交流振动信号,短时间内连续两个雨滴振动信号之间会产生混叠,造成一个雨滴的振动波包在衰减过程中出现额外的峰值,如图3(a)所示。为此,笔者提出了不直接测量雨滴波包的峰值电压,而是通过采集传感器输出

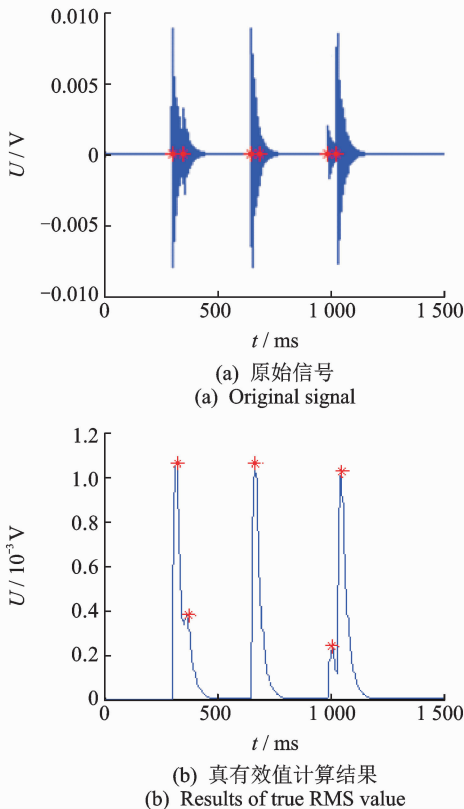


图3 不同大小雨滴连续激励仿真信号

Fig. 3 Simulated signals for continuous excitation of raindrops of different sizes

信号的电压真有效值来间接估计峰值电压<sup>[13]</sup>、区分不同雨滴,如图3(b)所示。电压真有效值即为均方根值

$$U_{\text{RMS}}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t u(t)^2 dt} \quad (6)$$

其中: $U_{\text{RMS}}(t)$ 为电压真有效值; $u(t)$ 为原始电压信号; $T$ 为积分时间。

当 $T=1/f_N$ ,即积分时间等于信号的振动周期时,有

$$U_{\text{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m \quad (7)$$

其中: $U_m$ 为一个振动周期内 $u(t)$ 的最大值; $U_{\text{RMS}}$ 为对应真有效值电压信号的峰值。

为了使真有效值信号更加稳定,积分时间可以取3~10个振动周期,此时

$$U_{\text{RMS}} = \frac{U_m}{k_p} \quad (8)$$

其中: $k_p$ 为该积分时间下的波峰因数。

采集电压真有效值的峰值即可估计原始电压信号峰值的高低。当一个雨滴出现时,真有效值信号会发生一次阶跃,然后呈指数衰减。当另一个雨滴出现时,真有效值信号会再次发生阶跃,然后再次呈指数衰减。因此,通过发现真有效值信号的局部极值,即可区分不同的雨滴。相比于原始的振动信号,经过真有效值转换后的直流信号更有利于不同雨滴的识别和峰值电压的提取。

### 2.2 仿真实验

为了验证雨滴间隔时间对测量结果的影响,笔者利用数值仿真的方法来模拟传感器在实际降雨中的输出信号。本研究采用的压电元件是厚度为0.43 mm的PZT-4压电陶瓷片,其固有频率在MHz范围。当压电元件粘贴到传感器内表面后,雨滴激励下的传感器表面材料发生振动变形,引起压电元件的压电效应,输出指数衰减的正弦信号。单个雨滴激励时,此正弦信号的频率即雨量传感器的固有频率,主要由传感器壳体与压电片粘合体的固有振动频率 $f_N$ 决定,可以通过对正弦信号进行快速傅里叶变换获得。本研究的传感器固有频率 $f_N=770$  Hz。设一个雨滴激励下的振动信号为衰减正弦脉冲

$$u(t) = A \exp[-B(t-t_0)] \sin(\omega_N t + \frac{\pi}{2}) \quad (9)$$

其中: $A$ 为信号幅值; $B$ 为衰减系数; $t_0$ 为起振时间,即雨滴撞击传感器的时刻; $\omega_N=2\pi f_N$ ,为传感器固

有振动角频率。

当  $A = U_m$ , 取  $B = 40$ , 由式(4)和式(9)可以计算不同粒径大小的雨滴激励下的输出信号, 将每个雨滴激励信号按照采集的时间顺序叠加, 得到总的传感器输出信号, 再计算信号的真有效值, 提取其峰值可得到每个雨滴对应的真电压峰值。根据式(4)建立雨滴粒径和电压的对应关系, 得到每个电压对应的雨滴粒径的测量值, 与真值对比可以得到计算误差。

仿真模拟连续两个雨滴重叠的情形。设雨滴粒径直径为 1 mm 和 1.5 mm 两种。图 3(a) 为 3 种不同情形下连续两个雨滴激励下的传感器输出信号。图 3(b) 为图 3(a) 对应的真有效值计算结果, 图中第 1, 2 组波包为大雨滴在前、小雨滴在后, 但第 2 组波包中两个雨滴的时间间隔比第 1 组更短, 第 3 组波包为小雨滴在前, 时间间隔与第 1 组相同。可以看出, 第 1, 3 组两种情况下可以在真有效值信号中识别出两个峰值的位置和大小, 第 2 组则只能识别一个峰值。因此, 当传感器采集到连续两个间隔时间很短、且后一个雨滴粒径小于前一个雨滴时, 会使测量中丢失部分雨滴的信息, 这种信号混叠的情形常发生在大雨量降雨的测量中, 从而导致雨量测量误差。

为了验证上述雨滴信息丢失对总体雨量测量误差的影响程度, 笔者通过仿真模拟了 5 000 个雨滴

的测量结果。研究表明<sup>[14]</sup>, 雨滴谱可以用对数正态分布、M-P 分布、Gamma 分布等函数来描述, 其中 M-P 分布和 Gamma 分布最为常用。本研究假设雨滴的粒径服从 Gamma 分布

$$D \sim Ga(\alpha, \beta) \quad (10)$$

雨滴采集的时间间隔服从对数正态分布

$$\ln \Delta T \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (11)$$

雨滴跌落位置在传感区域内为位置均匀分布, 按照如图 2(d) 的跌落位置-响应对应关系得到不同跌落位置的机电转换系数。当取  $\alpha = 2, \beta = 2, \mu = 6.2, \sigma^2 = 0.014$  时, 模拟雨滴粒径均值为 1 mm, 方差为  $0.5 \text{ mm}^2$ , 间隔时间均值为 0.5 s, 方差为  $0.05 \text{ s}^2$ , 对应降雨强度为  $0.005 \text{ mm/min}$ , 雨滴分布稀疏, 几乎没有雨滴丢失, 雨量测量误差为 0.5%。当取  $\alpha = 3, \beta = 2, \mu = 4.8, \sigma^2 = 0.57$  时, 模拟雨滴粒径均值为 1.5 mm, 方差为  $0.75 \text{ mm}^2$ , 间隔时间均值为 0.125 s, 方差为  $0.05 \text{ s}^2$ , 对应降雨强度为  $0.05 \text{ mm/min}$ , 雨滴分布稠密, 真有效值电压信号产生混叠, 最多会丢失 13% 的雨滴, 测量误差为 1.2%。

图 4 为雨滴粒径分布测量仿真结果。可以看到, 虽然有一些雨滴不能被传感器有效采样到, 但在测量中丢失的雨滴粒径主要分布在  $0 \sim 1.5 \text{ mm}$  之间, 雨滴体积占总体积的比例小, 对总体雨量测量结果的影响不大。

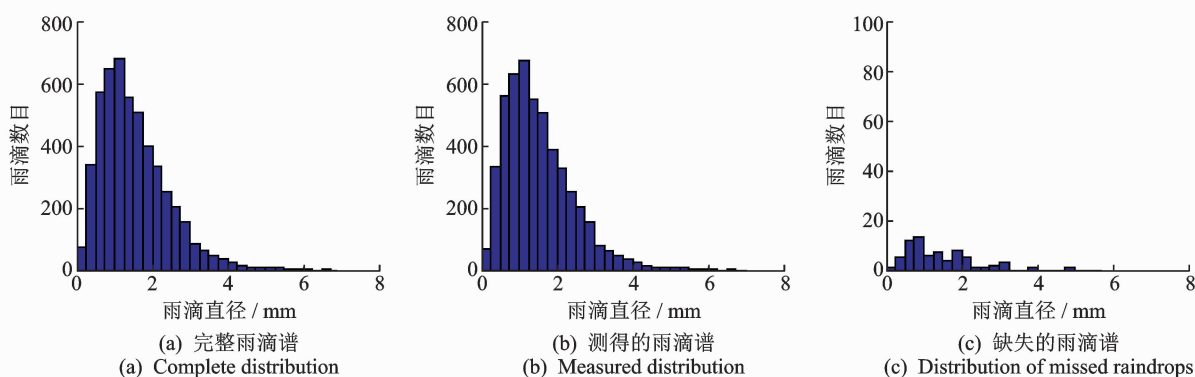


图 4 雨滴粒径分布测量仿真结果

Fig. 4 Simulation of raindrop size distribution measurement

### 3 检测系统设计及测试

#### 3.1 检测系统设计

如图 5 所示, 整个传感器系统硬件结构包含压电振子、信号变送采集电路和上位机。压电振子由外壳和压电传感元件组成, 将雨滴撞击产生的机械振动转换为电信号。为了兼顾大、小雨滴的测量, 采

集电路将压电元件输出的信号做两路并行处理。一路做 1 倍放大, 另一路做 100 倍放大, 分别经过带通滤波电路去除高频噪声以及低频纹波干扰信号, 得到清晰的振动脉冲信号。使用两个真有效值转换器 AD536A 将滤波后的振动脉冲信号转换为直流脉冲信号, 这种转换方法既能够避免使用电桥法整流造成的小于二极管正向压降的小信号的损失, 又可以有效降低所需 A/D 转换器的采样频率。

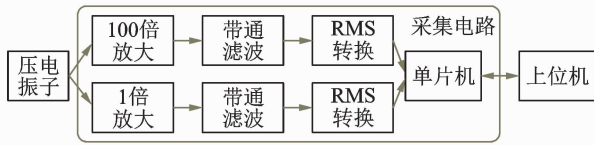


图 5 系统硬件结构框图

Fig. 5 Schematic diagram of system hardware

单片机片内内置的高速 A/D 转换器将两路模拟信号转换为数字信号,将每个脉冲的峰值电压转换为每个雨滴的体积,再由单片机通过串口将雨量信息传输给上位机,从而实现降雨参数的测量。传感器结构如图 6 所示。

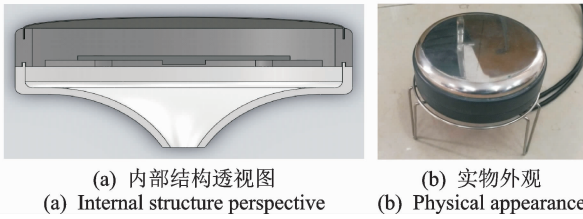


图 6 传感器结构

Fig. 6 Sensor architecture

主程序中在 A/D 转换时会根据 100 倍放大后信号幅值判断该路信号是否在放大的过程中由于超过芯片供电电压而被削顶。若判断信号被削顶,则在该脉冲信号归零前都用单倍放大的信号乘以 100 替代被削顶的部分。将每一个雨滴对应的脉冲峰值电压代入提前标定的峰值电压-雨滴粒径关系表,获得雨滴粒径和雨量。该表可以通过等动量测量法<sup>[15]</sup>或自适应训练法<sup>[16]</sup>等标定方法得到。系统与上位机之间通过 RS232 总线通信,通过上位机控制发送查询指令的间隔来调整采集时间,实现不同时间段的降雨参数统计。

### 3.2 基于等动量法的雨滴粒径标定

在单个雨滴粒径的等动量标定过程中,可以使用滴定管和铁架台来生成水滴,通过调节铁架台控制滴定管的高度来模拟不同动量的雨滴对传感器的冲击力。设滴定管初始液位刻度为  $h_1$ ,滴出  $N$  滴水滴后的液位刻度为  $h_2$ ,则可求出滴定管滴出水滴的平均体积为

$$V = \frac{h_2 - h_1}{N} \quad (12)$$

水滴的直径为

$$D = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} V} \quad (13)$$

在雨滴粒径已知条件下,根据式(1)可得到雨滴的下落终速,记作  $v_l$ 。由于标定装置的滴定管高度低,故水滴在到达传感器表面时无法达到实际降雨的终速。这里假设下落过程中,在水滴达到下落终速之前,加速度是连续均匀减小的,则水滴下落的距离方程和速度方程<sup>[17]</sup>为

$$s(t) = \frac{1}{2}gt^2 - \frac{g^2}{12v_l}t^3 \quad (14)$$

$$u(t) = gt - \frac{g^2}{12v_l}t^2 \quad (15)$$

根据水滴的大小和下落高度,由式(14)可以求得下落时间,代入式(15)即可求得水滴到达传感器表面的速度,进而得到动量大小。将计算得到的水滴动量和实际降雨的雨滴终速代入式(2),可计算出实际降雨中的雨滴质量,进而获得等效的雨滴粒径。由此建立该动量激励下传感器输出电压和该动量对应的实际雨滴粒径之间的对应关系,根据计算水滴的体积和直径,调节铁架台来改变滴定管和传感器上表面之间的高低差,在每个高度下测量计算传感器输出电压的平均值,即认为该平均值电压是该高度下水滴动量对应的传感器输出。实验中测得的不同下落高度下对应的理论动量及传感器输出电压如表 1 所示。

表 1 水滴不同下落高度对应的理论动量

Tab. 1 Theoretical momentum corresponding to different drop heights of water droplets

高度/ cm	理论动量/ ( $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	等效雨滴粒径/ mm	输出电压/ V
20	0.927 5	1.49	0.092 8
30	1.112 0	1.57	0.137 0
40	1.260 7	1.62	0.161 0
50	1.386 5	1.67	0.176 0
60	1.496 1	1.71	0.244 0

由式(1)可知,在等动量法模拟的范围内,雨滴理论下落终速与雨滴粒径为近似正比关系。由于雨滴质量和雨滴粒径的三次方成正比,所以不妨设传感器输出电压和粒径的四次方成正比,并且拟合曲线应穿过坐标系原点,根据表 1 中的等效雨滴粒径和传感器输出电压数据可以得到拟合标定曲线,建立在等动量法模拟范围内的传感器输出电压和雨滴直径的对应关系,拟合曲线如图 7 所示。

### 3.3 基于模拟降雨环境的雨量标定

雨量的标定可以借助模拟降雨环境和标准的翻斗雨量计来实现,得到等动量法能够模拟的粒径范

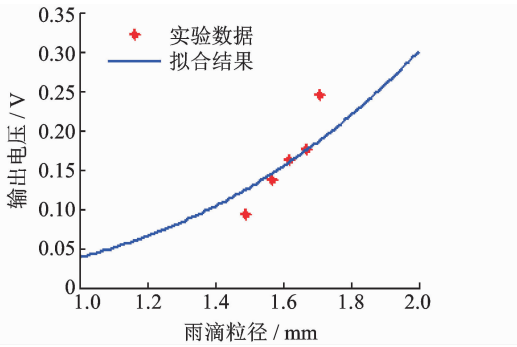


图7 等动量法拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of equal momentum method

围外的标定系数。由于水滴下落高度较低,不能达到雨滴的下落终速,所以设在该模拟降雨环境下雨滴终速相同,则雨滴体积-输出电压响应函数为线性关系,计算实验条件下的标定系数

$$R(t) = V(t) / S = k \sum_{i=1}^N U_{\text{RMS}}(i) \quad (16)$$

其中: $R(t)$ 为 $t$ 时刻的累计降雨量; $V(t)$ 为雨滴的累计体积; $S$ 为压电式雨量传感器的有效采样面积; $U_{\text{RMS}}(i)$ 为每个脉冲的峰值电压; $N$ 为到 $t$ 时刻为止采集到的雨滴数目。

通过采集雨量计输出 $R(t)$ 和压电传感器输出 $U_{\text{RMS}}(i)$ ,即可计算标定系数 $k$ 。

模拟降雨的喷头架设在距离地面高5m处,通过喷头来模拟降雨环境。为了保证压电雨量传感器接收到的雨滴都能落到翻斗雨量计内,压电式雨量传感器和翻斗雨量计重叠固定在喷头下方,实验中使用的翻斗雨量计为精密型双翻斗式雨量计,分辨力为0.2mm。在模拟降雨过程中,压电雨量传感器和翻斗雨量计同时开始采集数据,并把数据传输到上位机。图8为两组实验数据。压电传感器峰值电压累加和如图8(a)所示,翻斗雨量计输出雨量累计如图8(b)所示。

将每次雨量计翻转时刻的电压累计数据带入式(16),可通过最小二乘法拟合得到标定系数 $k$ 。图9为使用最小二乘法拟合标定后的压电式传感器输出和雨量计输出对比,二者具有相似的走势。

需要指出的是,对于基于等动量法的雨滴粒径标定方法和基于模拟降雨环境的雨量标定方法,两者在理论上是等效的。例如,利用前者获得的传感器输出电压-雨滴粒径关系,可计算得到每个雨滴的体积,累积起来即可获得雨量。反过来,将后者的标定系数 $k$ 代入单个雨滴的测量中,得到雨滴粒径和传感器输出电压的对应关系

$$U_{\text{RMS}} = \frac{V}{kS} = \frac{\pi D^3}{6kS} \quad (17)$$

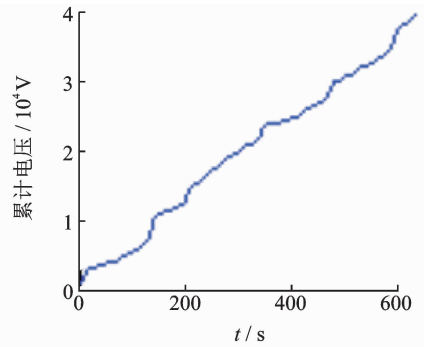
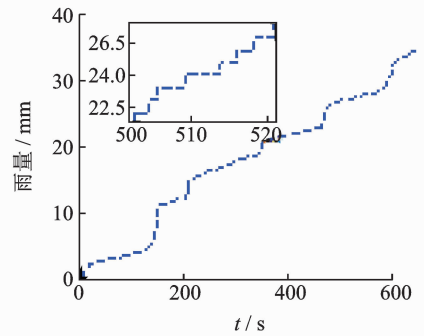
(a) 压电传感器输出电压的累加和  
(a) Accumulative sum of output voltage(b) 翻斗雨量计输出雨量累计  
(b) The output of tipping bucket

图8 实验数据

Fig. 8 Experimental data

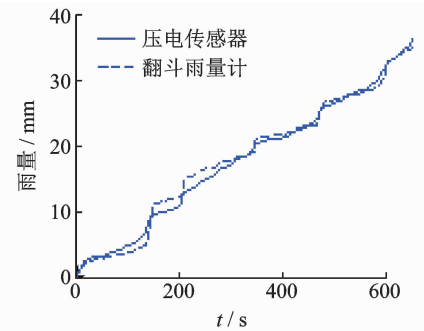


图9 两种输出结果对比

Fig. 9 Comparison of two output results

图10为两种标定方法对比,可以看出,两者有相似的走势,但对于相同的传感器输出电压,模拟降雨法估计的雨滴粒径小于等动量法,造成这一现象的主要原因是雨滴混叠现象。当雨滴混叠时,测量得到的 $U_{\text{RMS}}$ 比无混叠时增大,式(16)计算出的标定系数 $k$ 值偏小。在单个雨滴作用下,根据式(17),对于相同的传感器输出 $U_{\text{RMS}}$ ,雨滴粒径 $D$ 的估计值会偏小。因此,在实际应用中应该针对被测参数采用更为直接的标定方法,即雨量的标定应采用模拟降雨法,雨滴粒径的标定应该采用等动量法。为了避免两个雨滴混叠对粒径谱估计精度的影响,可以忽

略发生混叠时第 2 个雨滴的粒径样本。

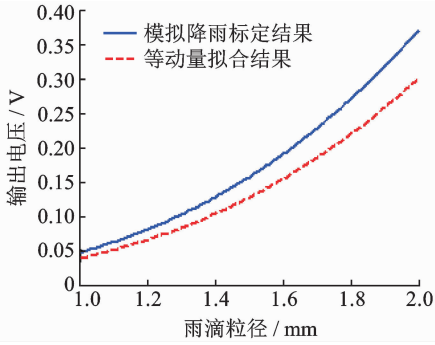


图 10 两种标定方法对比

Fig. 10 Comparison of two calibration methods

### 3.4 系统测试

为了验证笔者提出的压电式雨量传感器的检测效果,在水利水电科学研究院北京八达岭实验基地的人工模拟降雨大厅进行了模拟降雨测试,现场实验照片如图 11 所示。模拟降雨大厅的有效降雨高度为 12m,能够较好模拟自然雨滴的下落终速,降雨强度的连续可控变化范围为 10~200 mm/h。

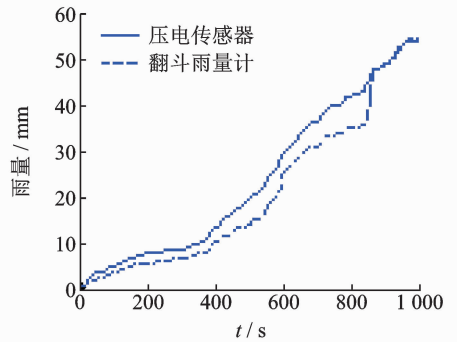


图 11 现场实验照片

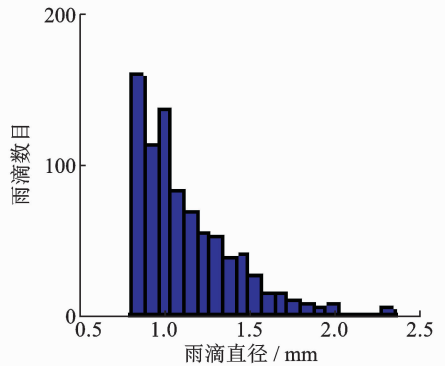
Fig. 11 Pictures of field experiments

图 12 为系统测试实验结果。图 12(a)为在一次测量实验中,传感器的输出雨量数据与翻斗雨量计累计雨量的对比图。可以看出,二者的输出能够保持相近的变化趋势,但是在 850~900 s 时段内雨量计连续翻转,与压电传感器输出有较大差别,这是因为由于表面张力逐渐吸附在翻斗雨量计器壁上的水逐渐积聚后在重力作用下流入翻斗导致的,这也

说明了翻斗雨量计的输出具有不确定的延时,相比于压电式传感器测量数据的实时性较差。经多次测试可以发现,标定后雨量传感器的累计雨量相对误差为 2.4%,与 1.2%的仿真结果相似。雨滴粒径分布可根据式(17)计算得到,如图 12(b)所示。可以看到,该次模拟降雨的雨滴粒径主要分布在 0.75~2 mm 之间,且由于降雨喷头处的水滴表面张力作用,在模拟降雨中没有粒径小于 0.75 mm 的小雨滴,因此雨滴粒径分布相较典型的 Gamma 分布在 0.75mm 以下发生截断。



(a) 传感器输出雨量对比  
(a) Comparison of sensor outputs



(b) 雨滴粒径分布  
(b) Raindrop size distribution

图 12 系统测试实验结果

Fig. 12 System test results

## 4 结束语

笔者提出多压电陶瓷片阵列作为传感元件,使传感区域获得较为均匀的振动响应,以减小边界效应对测量的影响。硬件真有效值转换的数据处理方法提取压电元件输出信号的峰值的方法,设计了基于压电效应原理的降雨量测量传感器,可以实现自动连续测量记录雨滴数量、粒径大小、降雨量和实时降雨强度等信息。实验测试结果表明,压电式雨量传感器降雨量的实时检测精度为 2.4%,能够实时记录降雨微观特征,且传感器具有体积小、精度高及实时性好等特点。笔者设计的该降雨测量仪器能够

连续测量并记录雨滴粒径,并能稳定获得降雨强度和某时段的降雨量。本研究为基于动力学原理的降雨量检测提供了新思路,可用于气象站及野外环境的降雨检测,具有较高的实用价值。

### 参 考 文 献

- [1] KATHIRAVELU G, LUCKE T, NICHOLS P. Rain drop measurement techniques: a review [J]. *Water*, 2016, 8(29):1-20.
- [2] LÖFFLERMANG M, JOSS J. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2000, 17(2):130-139.
- [3] 曲立国, 黄友锐, 唐超礼, 等. 基于 FPGA 的线阵 CCD 雨滴图像快速连续识别方法 [J]. *光电工程*, 2012, 39(10):103-110.  
QU Ligu, HUANG Yourui, TANG Chaoli, et al. Rapid and continuous identification method of linear array CCD dynamic raindrop image based on FPGA [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(10):103-110. (in Chinese)
- [4] 徐沾伟, 郑贵林. 基于声学自校正原理的超声式雨量计 [J]. *自动化与仪表*, 2012(3):13-15.  
XU Zhanwei, ZHENG Guilin. Ultrasonic rain gauge based on acoustic self-calibration principle [J]. *Automation & Instrumentation*, 2012(3):13-15. (in Chinese)
- [5] TOKAY A, BASHOR P G, WOLFF K R. Error characteristics of rainfall measurements by collocated Joss Waldvogel disdrometers [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2004, 22(5): 513-527.
- [6] SALMI A. New piezoelectric vaisala raincap precipitation sensor [C] // The 19th AMS Conference on Hydrology. San Diego, USA; American Meteorological Society, 2005: 45-69.
- [7] BAGREE R. Characterization and design of a readout circuit for a piezoelectric-based acoustic disdrometer [J]. *Microelectronics & Computer Engineering*, 2012, 2(1):4-9.
- [8] JAYAWARDENA A W, REZAUR R B. Measuring drop size distribution and kinetic energy of rainfall using a force transducer [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 14(1):37-49.
- [9] LANE J E, KASPARIS T, METZGER P T, et al. Insitu, disdrometer calibration using multiple DSD moments [J]. *Acta Geophysica*, 2014, 62(6):1450-1477.
- [10] 刘俊杰, 周秀芝. 雨滴下落收尾速度的一般讨论 [J]. *物理与工程*, 2010, 20(5):17-19.
- LIU Junjie, ZHOU Xiuzhi. Common discussion of the terminal velocity of the falling raindrops [J]. *Physics and Engineering*, 2010, 20(5):17-19. (in Chinese)
- [11] 刘西川, 高太长, 刘磊, 等. 雨滴微物理特征研究及测量技术进展 [J]. *地球科学进展*, 2013(11):1217-1226.  
LIU Xichuan, GAO Taichang, LIU Lei, et al. Advances in microphysical features and measurement techniques of raindrops [J]. *Advances in Earth Science*, 2013(11):1217-1226. (in Chinese)
- [12] 陈江攀, 程伟, 李名. 压电式力传感器的低频补偿方法及实验验证 [J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(2): 325-328.  
CHEN Jiangpan, CHENG Wei, LI Ming. Low-frequency compensation method of piezoelectric force sensor and experimental verification [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(2): 325-328. (in Chinese)
- [13] 姚新科, 彭瀚旻, 胡捷, 等. 基于压电双晶片的风速辨识系统 [J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(1):190-195.  
YAO Xinke, PENG Hanmin, HU Jie, et al. Wind speed identification system based on piezoelectric bimorphs [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(1):190-195. (in Chinese)
- [14] 郑娇恒, 陈宝君. 雨滴谱分布函数的选择: M-P 和 Gamma 分布的对比研究 [J]. *气象科学*, 2007, 27(1): 17-25.  
ZHENG Jiaoheng, CHEN Baojun. Comparative study of exponential and gamma functional fits to observed raindrop size distribution [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, 27(1):17-25. (in Chinese)
- [15] 刘红燕. 雨滴谱仪器的设计与雨滴谱资料的分析 [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2006.
- [16] KASPARIS T, LANE J, JONES L. Modeling of an impact transducer for in situ adaptive disdrometer calibration [C] // International Symposium on Communications, Control and Signal Processing. [S. l.]: IEEE, 2010:1-4.
- [17] 刘大为, 阎爱玲. 雨滴运动分析 [J]. *科学技术与工程*, 2006, 6(9):1266-1269.  
LIU Dawei, YAN Ailing. Raindrop movement analysis [J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(9): 1266-1269. (in Chinese)



**第一作者简介:**朱力强,男,1972年5月生,博士、副教授、博士生导师。主要研究方向为智能检测技术。曾发表《高寒地区高速铁路路基冻胀远程监测》(《铁道学报》2019年第41卷第1期)等论文。  
E-mail: lqzhu@bjtu.edu.cn