

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230307007

基于压电纤维复合材料的风沙冲击力传感器研究*

李正农¹, 王艺舒^{1,2}, 蒲 鸥¹, 吴红华¹, 赵爱国³

(1. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南长沙 410082; 2. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 沙尘暴是一种多发于沙漠等干旱地区的灾害天气, 建(构)筑物常受其影响被侵蚀甚至产生破坏, 这种破坏的本质是风沙两相流中沙粒对结构表面冲击产生细微损伤的积累。为了深入探索这种风沙两相流对结构的冲击作用和沙粒冲击力在结构表面的分布规律, 研究了采用压电纤维复合材料作为力传感器来测量风沙流场中沙粒冲击力的方法, 通过标定试验建立了压电传感器所受沙粒冲击力与其输出电信号之间的数学模型, 构建了基于压电纤维复合材料的风沙冲击力传感器。分别采用高频测力天平和压电传感器测量低矮房屋迎风面在风沙风洞试验中所受到的沙粒冲击力, 验证压电传感器测量沙粒冲击力的适用性和准确性。结果显示: 两种测力方式的结果总体相差在-4.72%~5.80%, 两种试验结果吻合良好; 建筑物迎风面内侧所受到的沙粒冲击力大于外侧所受到的沙粒冲击力, 沙粒冲击力的分布与表面风压力分布具有一定相关关系。研究成果可为结构防风沙灾害的相关研究提供参考。

关键词: 沙粒冲击力; 压电纤维复合材料; 力传感器; 低矮房屋

中图分类号: TU312+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-0923-11

Research on Impact Force Sensor of Wind-Driven Sand Based on Piezoelectric Fiber Composites

LI Zhengnong¹, WANG Yishu^{1,2}, PU Ou¹, WU Honghua¹, ZHAO Aiguo³

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Beijing 100083, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730030, China)

Abstract: Sandstorms are a kind of natural disaster mostly occurring in deserts and other arid areas, which often cause erosion and damage to buildings. The essence of this damage is the accumulation of subtle damages caused by the impact of sand particles on the structure's surface in the wind-sand two-phase flow. In order to investigate the impact of wind-sand two-phase flow on structures and the distribution of sand particle impact forces on structure surfaces, a method using piezoelectric fiber composites as force sensors to measure the impact forces of sand particles in the wind-sand flow field was studied. A mathematical model between the impact force of sand particles on the piezoelectric sensor and

* 收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178476)、北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室开放课题(2021-KF-3)、武汉理工大学三亚科教园开放基金(2001KF007)资助

作者简介: 李正农(1962—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事结构风工程研究。E-mail: zhn88@263.net

its output electrical signal was established through calibration experiments, and a wind-sand impact force sensor based on piezoelectric fiber composite materials was constructed. High-frequency force sensor and piezoelectric sensor were respectively used to measure the impact force of sand particles on the windward face of low-rise buildings in wind-sand tunnel tests, to verify the applicability and accuracy of the piezoelectric sensor in measuring sand particles impact force. The results showed that the difference between the two methods was generally between -4.72% and 5.80% , and the two sets of experimental results were in good agreement. The impact force of sand particles on the inner side of the windward face of the building was greater than that on the outer side, and the distribution of impact force had a certain correlation with the distribution of surface wind pressure. The research findings can provide a reference for research related to structural defense against wind and sand hazards.

Keywords: sand impact force; piezoelectric fiber composites; force sensor; low-rise building

0 引言

沙尘暴是一种灾害性气象现象,指在特定路径下,风携带大量沙尘移动和扩散,导致空气污浊,能见度显著下降。沙尘暴的发生会造成地表物质的侵蚀、搬运和堆积,从而改变局部地表形态,形成各种风沙地貌,甚至可能引发较大的灾害。沙尘暴本质上是风沙两相流的现象,其中沙粒对结构产生冲击,会在结构表面产生微小的损伤。这种损伤的积累会导致结构发生不同程度的侵蚀和破坏。因此,研究沙粒冲击力的大小对于深入了解风蚀灾害的产生机理和过程具有重要意义。此外,风沙两相流对建筑物产生的作用力由风荷载和沙粒冲击荷载两部分组成。而当前我国的结构荷载规范中只考虑了风荷载而没有考虑沙粒冲击荷载^[1]。国内外相关学者的研究表明,风沙两相流对结构产生的冲击荷载要大于净风场下结构所受到的风荷载^[2-4]。尽管沙粒的冲击荷载在其中所占比例不大,但仍可以对结构局部造成损伤和破坏。因此,研究沙粒冲击力的大小和分布规律具有重要的理论和实际意义。

沙粒粒径微小,在风沙流与物体碰撞时间非常短,由于当前测量仪器和研究方法的局限性,对于沙粒冲击力的研究成果还相对较少。已有的研究可分为两种。一种是通过理论推导,分析风速、湍流强度和动力黏度等因素对沙粒运动的影响^[5-6],从而计算出沙粒的速度、加速度等运动参数,并利用相关碰撞理论计算沙粒的冲击荷载^[7]。然而,这种理论分析得到的沙粒冲击荷载缺乏风洞试验或室外实测的验证,因此准确性有待考量。另一种方法是利用风沙风洞试验,测量物体表面总的风沙冲击

力,并计算出净风压力,二者之差即为沙粒冲击力^[8]。虽然这种方法能够较为准确地测量沙粒冲击力,但只能测量迎风面总的沙粒冲击力,难以了解迎风面沙粒冲击分布规律。因此,需要一种全新的思路和方法来测量风沙流场中沙粒对物体表面的冲击力。

压电材料是一种可以将机械能和电能相互转换的功能材料,其具有良好的传感性能,国内外学者在其冲击传感性能研究方面也做了许多研究工作。张智丹等^[9]采用霍普金森压杆装置对PVDF压电薄膜和PZT-5压电陶瓷在冲击荷载作用下的动态性能进行测试,实验结果表明这两种压电材料在动态荷载的作用下有很好的线性度和灵敏度,能够作为冲击力传感器;M. C. Chure等^[10]从能量角度出发,验证了压电陶瓷产生的电能和受到冲击消耗的机械能之间的相关性。在此理论上,压电陶瓷材料在冲击传感器方面获得了广泛应用,有学者基于压电材料开发出测量雨量^[11]、冰雹强度^[12]和灌溉量^[13]等的传感系统,实现了对这些关键数据的全天候监测。目前,压电材料主要分为三大类。第一类是压电陶瓷,具有较大的压电常数、高灵敏度和快速响应的特点,但是它的硬度高、脆性大,难以应用于复杂结构表面。第二类是以聚偏二氟乙烯(PVDF)为代表的压电聚合物,这种材料虽然具有一定柔性但是其压电常数低,在激励信号较弱时产生的响应信号信噪比较低,非常影响测试精度。第三类是压电复合材料,是由压电陶瓷相和聚合物相按照一定空间结构复合制成^[14],宏纤维复合材料(Macro Fiber Composite, MFC)是其中最新也最有代表性的一种,其结构如图1所示。MFC兼具压电聚合物的柔性和压电陶瓷的高灵敏度、响应时间短

的特点,作为冲击传感器具有非常广阔的应用前景。虽然国内外在对结构进行损伤监测领域^[15-18]和振动主动控制领域^[19-21]对MFC进行了广泛的研究,但是将这种材料直接应用于冲击力测量方面的研究还很少。因此本文选取MFC为基本材料,构建了一种新型风沙冲击力传感器。通过标定试验,建立了MFC传感器所受沙粒冲击力与输出电压之间的数学关系。在风洞试验中,采用传统的六分量高频测力天平 and MFC传感器分别测量了低矮房屋迎风面的沙粒冲击力,并对比了两种测力结果,以检验MFC传感器测量沙粒冲击力的准确性和适用性。同时,本研究还分析了建筑物迎风面沙粒冲击力分布规律。

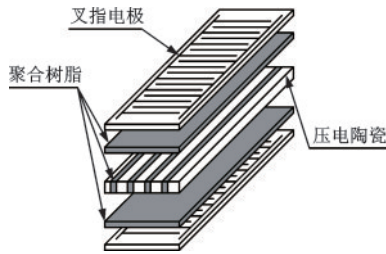


图1 MFC结构示意图
Fig.1 Structure of MFC

1 标定试验

1.1 试验仪器

标定试验装置如图2所示,盛满沙子的漏斗被固定于高度可调的铁架台上,沙子可从漏斗底部小孔落下冲击至MFC传感器使其电极上产生电荷信号。

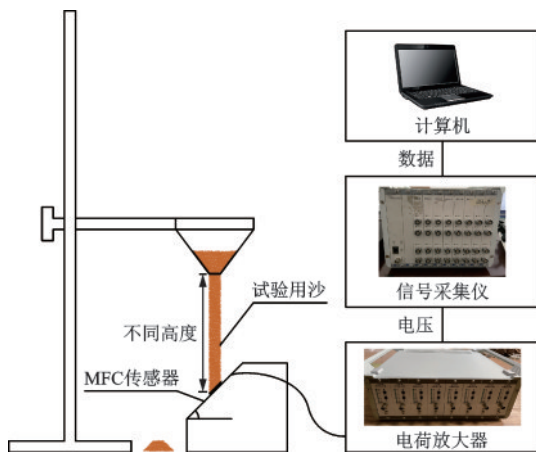


图2 标定试验装置
Fig.2 Calibration test equipment

为了避免沙子在传感器表面积聚影响后续沙流冲击信号的提取,传感器被固定于一个45°的斜面上。传感器电极两端连接至电荷放大器将产生的电荷信号转换为与电荷量成正比的电压信号。本次试验选取的是武汉优泰uT4108型电荷放大器,共8个信号通道,电荷输入范围 $\pm 5 \times 10^5$ pC。电荷放大器输出的电压信号由数据采集设备采集并存储至计算机中。信号采集设备选取的是东华DH5920N型动态信号采集仪,仪器共32个采集通道,最高采样频率128 kHz,能够很好的满足试验需求。

1.2 试验对象和方法

选取型号为P3-M2814的MFC作为冲击力传感器进行标定试验,实物图如图3所示,具体性能参数见表1。该型号MFC在图1所示的结构之外还包裹了一层聚酰亚胺薄膜,这种薄膜具有良好的绝缘和耐热性能,能够有效保护内部压电材料不受沙粒所带静电干扰。

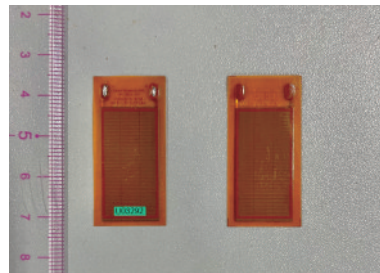


图3 MFC实物图
Fig.3 Photograph of MFC sensors

表1 P3-M2814压电纤维片技术参数

Table 1 Technical parameters of MFC(P3-M2814)

| 长度/mm | 宽度/mm | 静电容量/nF | 压电常数/(pC·N ⁻¹) |
|-------|-------|----------|----------------------------|
| 38 | 20 | 43(±20%) | 210 |

标定试验在室内无风环境中进行,控制一定质量的沙子从不同高度下落在传感器上施加不同大小的沙粒冲击荷载,同时采集传感器电压信号。通过分析沙子的运动过程,建立沙粒在空气中自由落体的运动模型,根据高度和单位时间落沙质量计算出沙子对传感器产生的单位时间平均冲击力。之后从采集到的电压时程信号中提取出沙粒的碰撞信号,计算单位时间内沙粒碰撞所产生的平均电压。将二者进行线性拟合,建立沙粒冲击力与传感器电压信号之间的数学模型。本次试验选定五个沙粒下落高度分别是0.06、0.09、0.12、0.15、0.18 m。

1.3 沙粒运动模型建立

假定沙粒是质量均匀的规则球体,受力分析如图4所示。沙粒在自由落体过程中受到自身重力 F_g ,空气摩擦阻力 F_r ,空气浮力 F_b 。

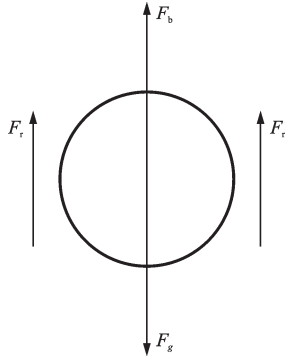


图4 沙粒受力分析

Fig.4 Force analysis of the sand particle

$$F_g = \frac{1}{6} \rho_s g \pi D^3 \quad (1)$$

$$F_b = \frac{1}{6} \rho_a g \pi D^3 \quad (2)$$

$$F_r = \frac{1}{2} C_D \rho_a A V^2 \quad (3)$$

式中, ρ_s 为沙粒密度,取值为 $2\,600\text{ kg/m}^3$; ρ_a 为空气密度,取值为 1.29 kg/m^3 ; g 为重力加速度,取值 $9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; D 为沙粒直径,取标定时所用的沙粒直径 $0.000\,65\text{ m}$; A 为沙粒在与运动方向垂直平面内的投影面积(m^2); V 为沙粒下落速度(m/s); C_D 为空气阻力系数,计算方式:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24(1 + 0.15Re^{0.687})}{Re}, & Re \leq 1\,000 \\ 0.44, & Re > 1\,000 \end{cases} \quad (4)$$

式中, Re 为雷诺数,计算方式: $Re = VD/\nu$,其中 ν 为空气黏性系数,查表取值为 $1.5 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ 。

沙粒在空气中下落运动分为两个阶段,第一阶段沙粒从静止开始做变加速直线运动,随着速度的增加,其受到的空气阻力逐渐增大,当受到的空气阻力和浮力的合力与其自身重力大小相等方向相反时,沙粒的下落运动进入第二阶段,即匀速直线运动阶段。这两个阶段的受力情况分别为:

$$m \frac{dV}{dt} = F_g - F_b - F_r \quad (5)$$

$$F_g = F_b + F_r \quad (6)$$

式中, m 为沙粒质量(kg); t 为时间(s)。

联立公式(5)与公式(1)、(2)、(3)后得到沙粒

下落第一阶段速度与时间之间的关系:

$$t = \frac{\ln(A + BV) - \ln(A - BV)}{2AB} \quad (7)$$

$$A = \left[\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) g \right]^{\frac{1}{2}}; B = \left(\frac{\pi D^2 \rho_a C_D}{8m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

将公式(7)中速度 V 对时间 t 进行积分得到下落高度 h 与时间 t 的关系:

$$h = \frac{At}{B} - \frac{1}{B^2} [2ABt - \ln(1 + e^{2ABt}) + \ln 2] \quad (9)$$

由公式(6)得到沙粒匀速运动阶段的速度 V_i 为:

$$V_i = \left[\frac{4gD}{3C_D} \left(\frac{\rho_s}{\rho_a} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

当沙粒速度达到 V_i 时,即 $V = V_i$ 时,沙粒开始做匀速直线运动。

1.4 标定参数的计算

1.4.1 单位时间沙粒平均冲击力的计算

沙粒对MFC传感器的碰撞可以视作小球与半无限平板的碰撞,假设不考虑小球的转动和摩擦力,碰撞过程为非完全弹性碰撞。根据hertz接触理论,碰撞的持续时间可以由以下公式来计算得到^[22]:

$$\Delta t = 1.47 \left[\left(\frac{5m}{4n} \right)^{2/5} \frac{1}{v^{1/5}} \right] \left(1 + \frac{1}{e^{1/5}} \right) \quad (11)$$

$$n = \frac{4\sqrt{R}}{3 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)} \quad (12)$$

式中, e 为沙粒弹性恢复系数,根据相关文献取 $0.8^{[23]}$; m 为单粒沙粒的质量(kg); v 为沙粒碰撞MFC传感器前运动速度(m/s),可由公式(7)和(9)计算得到; R 为沙粒半径(m),取值为 $0.000\,325\text{ m}$; μ_1 和 μ_2 分别为沙粒和MFC传感器的泊松比,分别取 0.2 和 0.3 ; E_1 和 E_2 分别为沙粒和MFC传感器的弹性模量,分别取 195 GPa 和 30 GPa 。代入这些参数计算得到在本次标定试验中沙粒的碰撞时间 Δt 在 $4.953 \times 10^{-6}\text{ s} \sim 5.484 \times 10^{-6}\text{ s}$ 。

由以上计算结果可知沙粒碰撞时间极短,因此使用狄拉克 δ 函数的形式来描述沙粒对MFC传感器的冲击力。在工程中常常需要研究空间上某一点或某一特定瞬间存在的物理量,如质点的密度、点电荷的电荷密度、单位时间冲击力等。如果单独

考察这类物理量某一点或某一时刻的大小,将得到无穷大,但这类物理量在空间或时间的积分却是有限的值。为了描述这种物理量的分布,学者们引入了狄拉克 δ 函数,其定义如下:

$$\delta(x - x_0) = 0, (x \neq x_0) \quad (13)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta_{x_0}(x) dx = 1 \quad (14)$$

在理想情况下,狄拉克 δ 函数只在 $x=x_0$ 处有值,而在其定义域上的积分为常数。如图5所示,考虑单粒沙子对MFC传感器的冲击碰撞过程产生的冲击力 $F(t)$ 则有:

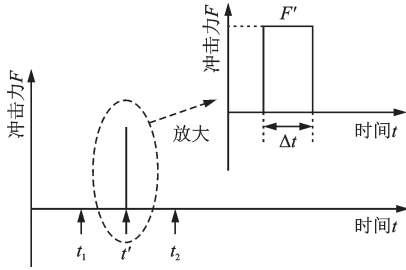


图5 单粒沙粒冲击力时程

Fig.5 Impact diagram of a single grain of sand in time

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t \neq t' \\ F', & t = t' \end{cases} \quad (15)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} F(t) dt = F' \Delta t \quad (16)$$

式中, F' 为沙粒在碰撞过程中的平均作用力(N); t' 为沙粒与传感器发生碰撞的时刻(s)。

根据动量定理可知,在碰撞过程中:

$$I = F' \Delta t = |mv_1 - mv_2| = (1 + e)mv = 1.8mv \quad (17)$$

式中, I 为碰撞过程的中沙粒所受力的冲量(N·s); F' 为沙粒在碰撞过程中的平均作用力(N)。代入式(16)得:

$$\int_{t_1}^{t_2} F(t) dt = 1.8mv \quad (18)$$

上式的物理意义是 t_1 至 t_2 时间段,沙粒冲击力 F 对时间 t 的积分可以由沙子所受到的冲量来表示。单颗沙粒的冲击力 F' 的表达式:

$$F' = \frac{I}{\Delta t} = \frac{1.8mv}{\Delta t} \quad (19)$$

考虑一般情况如图6所示,在 t_1 至 t_2 时间段内有 n 粒质量相同沙粒撞击MFC传感器,假设沙粒在空气中均匀分散下落,根据动量定理和等效原则在 t_1 至 t_2 时间段内,MFC传感器所受到的单位时间平均冲击力 \bar{F} 的表达式为:

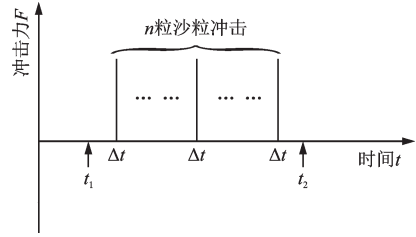


图6 单位时间内 n 颗沙粒冲击力时程

Fig.6 Impact force of n grains of sand per unit time

$$nF' \Delta t = \bar{F} \cdot (t_2 - t_1) \quad (20)$$

因此,沙子的单位时间平均冲击力 \bar{F} 可表达为:

$$\bar{F} = \frac{n \cdot F' \Delta t}{(t_2 - t_1)} = \frac{n \cdot \frac{1.8mv}{\Delta t} \cdot \Delta t}{(t_2 - t_1)} = \frac{1.8nmv}{(t_2 - t_1)} \quad (21)$$

根据采样时间段时长、采样时间内下落沙粒总质量、沙粒撞击前速度即可计算得到单位时间沙粒的平均冲击力。

1.4.2 单位时间平均电压的计算

根据压电效应的原理^[24],当MFC传感器在受到冲击力时会产生与冲击力大小成正比的电荷,电荷经电荷放大器处理之后转换成与电荷成正比的电压信号最后被信号采集设备记录并存储,即存在以下关系:

$$F \propto q \propto U \quad (22)$$

式中, F 表示沙粒的冲击力; q 表示MFC传感器产生的电荷量; U 表示采集到的电压。因此沙粒冲击力产生的电压信号,也可以用狄拉克 δ 函数形式表示:

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t \neq t' \\ U', & t = t' \end{cases} \quad (23)$$

式中, U' 为冲击力所产生的电压信号峰值(N); t' 为沙粒与传感器发生碰撞的时刻(s)。与沙粒单位时间平均作用力计算方法相同,在如图6所示的一般情况下,依据等效原则,该时间段内单位时间平均电压 \bar{U} 计算公式如下:

$$\bar{U} = \frac{n \cdot U' \cdot \Delta t}{t_2 - t_1} \quad (24)$$

如图7所示,对单粒沙粒冲击产生的电压进行高通滤波去除低频噪声后中发现在冲击力信号(最大峰值)之后会伴随一段峰值不断衰减的高频振动信号,这种干扰信号不能通过滤波去除。因此需要设计一种数据处理方法将冲击力信号从电压的时程信号中准确定位并提取。首先将滤波后的时程数据取绝对值,然后时程曲线通过取移动平均值的算法进行平滑处理,在不改变峰值点位置的同时将曲线变平滑,最后用峰值提取算法提取沙粒冲击信号所在的峰值点。流程示意如图8所示。

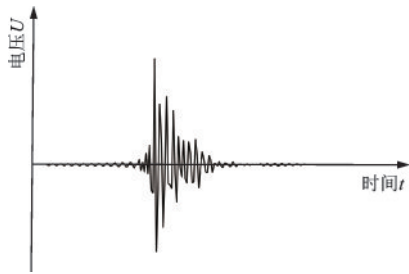


图7 单粒沙子冲击所产生的电压时程

Fig.7 Time history curve of voltage generated by the impact of a single grain of sand

经过处理之后的电压时程曲线中两个真实冲击信号之间仍存在一些因伴生振动而产生的峰值，这些非冲击峰值信号要小于真实的冲击信号。为了剔除这些干扰信号，需要设定拾取峰值的最小值 U_{min} ，其计算方法下：

$$U_{min} = \lambda U_{avg} \quad (25)$$

式中， U_{avg} 为剔除非冲击信号之前拾取到的全部峰值的平均值；根据标定实验的数据结果， λ 取0.3。提取所有沙粒冲击产生的电压峰值信号之后，根据式(24)即可计算得到单位时间平均电压。

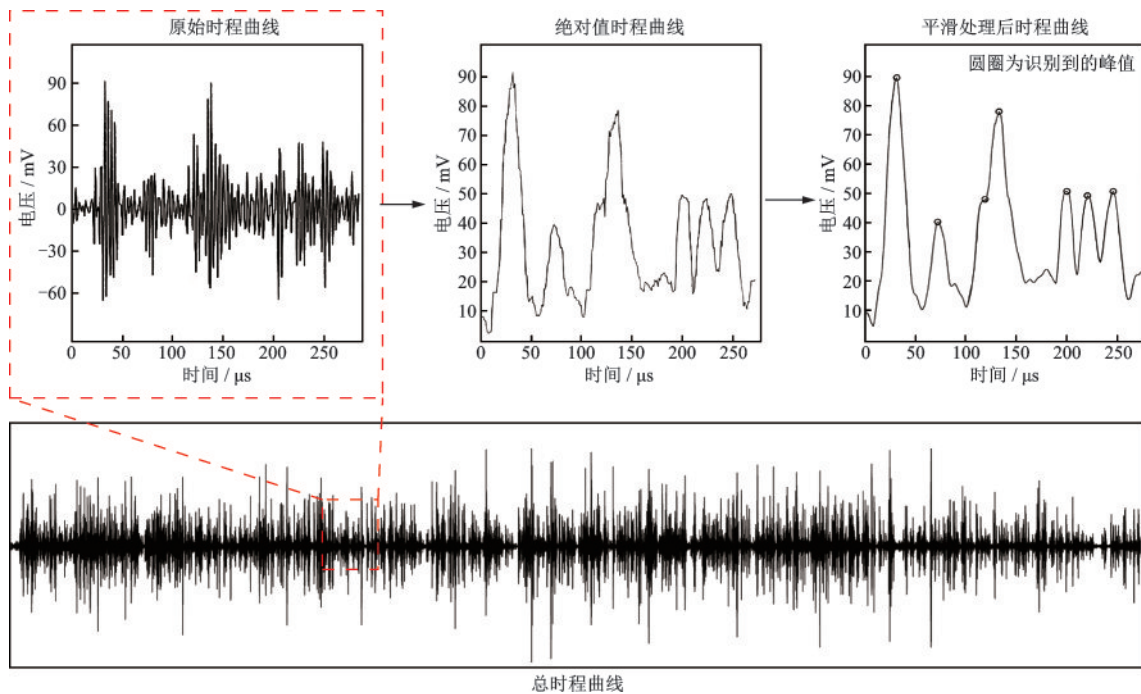


图8 电压时程数据处理过程

Fig.8 Voltage timing data processing

1.5 试验结果

根据公式(7)、(9)、(10)可以计算得到，沙粒做变加速直线运动到匀速直线运动的临界距离为7.904 m。因此沙粒在本次试验选取的五个高度内做自由落体运动时始终处于自由落体运动的第一阶段，即变加速直线运动阶段。表2给出了标定试

表2 标定试验数据

Table 2 Results of calibration test

| 高度/ m | 速度/ (m·s ⁻¹) | 落沙速度/ (g·s ⁻¹) | 平均冲击力/ (10 ⁻³ N) | 平均电压/ mV |
|----------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------|
| 0.06 | 1.054 | 2.417 | 3.215 | 89.766 |
| 0.09 | 1.277 | 2.437 | 4.011 | 114.365 |
| 0.12 | 1.462 | 2.414 | 4.541 | 127.273 |
| 0.15 | 1.620 | 2.390 | 4.910 | 145.875 |
| 0.18 | 1.759 | 2.424 | 5.357 | 152.420 |

验数据结果。

将单位时间的沙粒平均冲击力与单位时间的平均电压进行拟合后结果如图9所示。得到P3-M2814型MFC传感器所受沙粒冲击力与其输出平

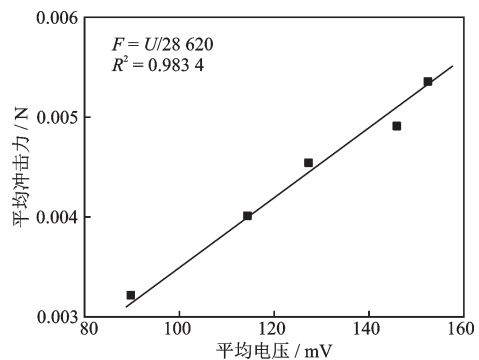


图9 沙粒冲击力与电压拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of average impact force and average voltage

均电压之间的数学模型:

$$\bar{F} = \bar{U}/28\ 620 \quad (26)$$

拟合优度 R^2 达到了 0.983 4, 表明单位时间内沙粒平均冲击力与 MFC 传感器产生的单位时间平均电压具有良好的线性相关关系。

2 风洞试验

2.1 试验概况

为了验证 MFC 传感器的标定成果的准确性开展风沙风洞试验, 在试验中分别采用六分量高频测力天平 and MFC 传感器实测低矮房屋模型在风沙流场中所受沙粒冲击力的大小, 分析对比二者测力结果并计算误差。

本次风沙风洞试验在中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室野外土壤风蚀风洞进行, 风洞试验段宽度 1.2 m, 高度 1.2 m, 可调风速范围 0 m/s 至 35 m/s。该风洞在前缘部分顶部位置设置漏沙槽, 试验时沙子通过漏沙槽底部的漏沙孔进入风洞, 经过风洞扩散段后在试验段模型处形成沙尘暴荷载边界。通过调整漏沙孔的数量, 可控制进入扩散段的沙浓度。该风洞配备了中科院沙漠与沙漠化重点实验室自主知识产权的防沙风速廓线测试仪如图 10 所示, 该测试仪能同时测量高度 0.002、0.004、0.008、0.016、0.032、0.064、0.128、0.200、0.350、0.500 m 共 10 个位置处的风速。



图 10 风速轮廓测试仪
Fig.10 Wind profiler

为了尽可能获取多组数据进行验证, 试验选取了三种控制风速分别是 9、11、13 m/s 和三种漏沙孔数分别是 0.5 孔、1 孔、2 孔 (对应的单位时间落沙量分别是 32、64、128 g/s) 共 9 种工况来模拟不同的风

沙风场。

2.2 六分量天平测力试验

2.2.1 试验设备和方案

本试验采用的设备是 45E12A4 型六分量高频动态测力天平如图 11 所示, 该天平最大采样频率 1 000 Hz, 最小分辨率 10^{-3} N, 误差 $\pm 0.25\%$, 量程 ± 200 N, 可以测量其所定义的空间坐标系中沿三个主坐标轴方向的力和绕三个坐标轴的力矩大小。

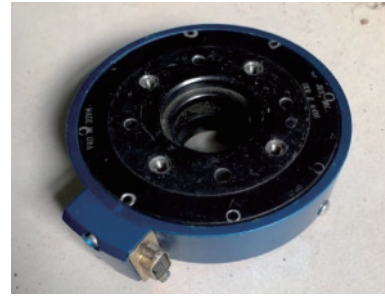


图 11 测力天平
Fig.11 Force-moment sensor

试验用模型采用双坡屋面房屋, 取 1:15 缩尺比, 模型尺寸为 $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.25\text{ m}$, 其中迎风面尺寸为 $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$, 并将其沿高度方向分为四等份编号。为准确测量各块板在风场中所受到的冲击力, 将待测迎风面板使用刚性连杆单独固定于测力天平, 并保证待测迎风面板仅与测力天平接触。试验模型布置方式与迎风面板划分方式如图 12 所示。

2.2.2 试验数据的处理与试验结果

在风沙风场中, 模型迎风面受到的合力 F_{ws} 即测力天平所测得的力可表示为

$$F_{ws} = F_w + F_s \quad (27)$$

式中, F_w 表示风压力 (kN); F_s 表示沙粒冲击力 (kN)。风在携沙运动的过程中, 自身一部分动能会转移到沙粒上, 因此在控制风速相等情况下在同一高度风沙风场中实际风速要小于净风风场下的实际风速。根据建筑物表面风荷载计算相关理论, 迎风面风压力应由下式计算得到:

$$F_w = \mu_s w_p s \quad (28)$$

$$w_p = 0.5 \rho_a v^2 \quad (29)$$

式中, μ_s 为体形系数; w_p 为迎风面板的风压 (kN/m^2); s 为迎风面板表面积 (m^2); ρ_a 为空气密度 (kg/m^3); v 为风速 (m/s)。在风沙风场中除风速 v

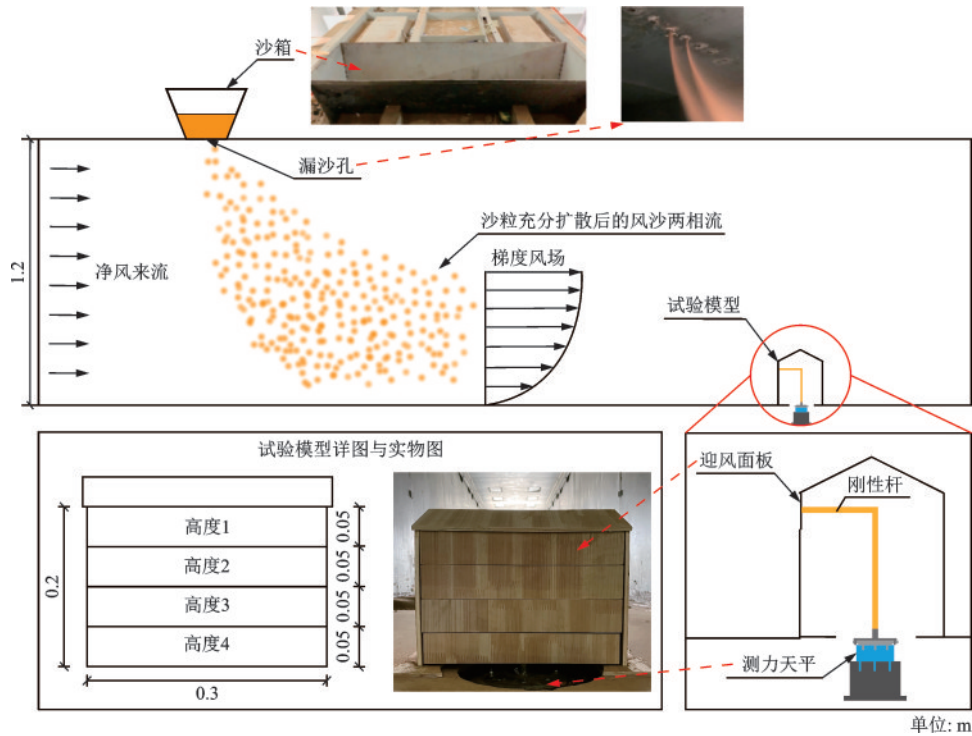


图 12 测力天平试验设备布置示意图

Fig.12 Arrangement of the force balance measurement experiment

外,其余各参数均与净风风场中相同,即迎风面板所受到的净风压力仅与风速 v 相关,因此可以通过此相关关系计算出风沙风场中的净风压力 F_w 和沙粒冲击力 F_s :

$$F_w = F_{w0} \cdot (v_1/v_0)^2 \quad (30)$$

$$F_s = F_{ws} - F_w \quad (31)$$

式中, F_{w0} 为净风风场中迎风面板所受到的风压力(净风场中可测得)(kN); v_1 为风沙风场中的风速(迎风面板中心所在高度风速)(m/s); v_0 为净风场中的风速(迎风面板中心所在高度处风速)(m/s)。

根据以上理论,测定 3 个控制风速下净风场和 9 种风沙风场工况的风速剖面,如图 13 所示,图中分

别用 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 来标注净风场和“0.5 孔”“1 孔”“2 孔”三种不同落沙速度下风剖面指数。通过插值的方式,计算得到迎风面各迎风面板中心高度处的风速。之后采用测力天平分别测量 12 个工况下各迎风面板所受的力,取采集时间内所测力的平均值进行沙粒冲击力的计算,最终计算得到 9 种风沙风场工况下各个迎风面板所受到的沙粒冲击力,见表 3。

测量结果显示,在风沙风场中当风速和单位时间落沙量一定时,沙粒的冲击力随着高度的增大而减小;在相同高度处沙粒冲击力随着风速和单位时间落沙量的增大而增大,这与文献[8]中得到的结论相符合。

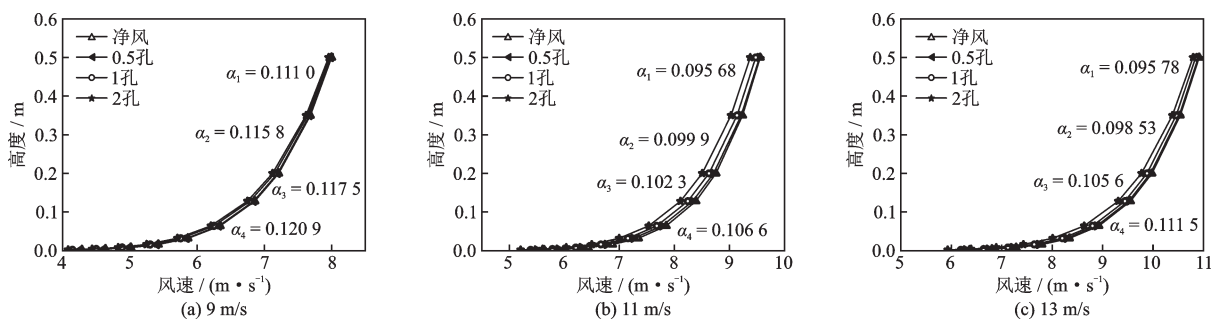


图 13 各工况下风速剖面

Fig.13 The wind profile at every controlled wind speed

表3 计算得到风沙工况下各高度面板的平均沙粒冲击力

Table 3 The calculated Sand impact force of panels at different heights

单位:(10^{-3} N)

| 高度 | 9 m/s | | | 11 m/s | | | 13 m/s | | |
|----|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| | 0.5孔 | 1孔 | 2孔 | 0.5孔 | 1孔 | 2孔 | 0.5孔 | 1孔 | 2孔 |
| 1 | 0.906 | 3.684 | 5.669 | 6.931 | 15.138 | 26.595 | 19.834 | 37.670 | 68.585 |
| 2 | 1.859 | 6.471 | 13.989 | 8.486 | 23.859 | 41.777 | 20.401 | 42.757 | 70.145 |
| 3 | 6.034 | 13.570 | 21.115 | 17.853 | 40.558 | 77.357 | 21.111 | 43.645 | 86.485 |
| 4 | 11.058 | 20.670 | 35.097 | 23.710 | 47.546 | 87.147 | 23.488 | 49.739 | 91.253 |
| 合计 | 19.857 | 44.396 | 75.870 | 56.980 | 127.102 | 232.876 | 84.834 | 173.812 | 316.469 |

2.3 MFC传感器测力试验

2.3.1 试验概况

使用8片经过标定的P3-2814型MFC传感器进行风沙测力试验,传感器布置在与天平测力试验相同的模型迎风面。本试验将整个迎风面板等分为左右两侧,取其左侧再次等分,靠近迎风面板中线部分为“内侧”,靠近迎风面板边缘为“外侧”,具体布置方式如图14所示。利用这些传感器测量9个风沙风场工况下模型迎风面所受到的沙粒冲击力。

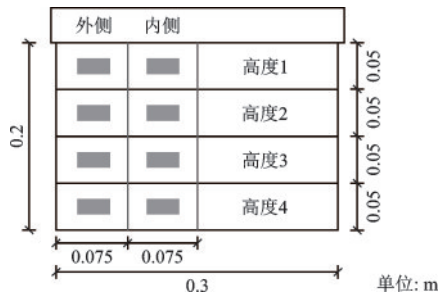


图14 MFC传感器布置示意
Fig.14 The arrangement of MFC

2.3.2 试验数据处理与结果

经过风洞试验获取到迎风面传感器受到沙粒冲击产生的电压时程信号之后,采用与标定试验中相同的数据处理方式计算单位时间平均电压,代入公式(20)计算单位时间平均沙粒冲击力。值得一提的是,MFC传感器所测得的电压信号中除沙粒冲击信号外还包括了风沙风场的脉动风压力信号,这种脉动风压信号的频率远小于沙粒冲击力的频率,因此对电压信号进行滤波处理可去除其影响。计算得到各个传感器单位时间内所受到的沙粒冲击力之后,分别计算各个高度迎风面板内侧和外侧所受到的单位时间平均沙粒冲击力。

将MFC传感器所测到的单位面积沙粒冲击力视作其所在内侧或外侧部分的单位面积沙粒冲击力,据此计算出模型迎风面各个高度内侧与外侧单位时间受到的平均沙粒冲击力,相加得到迎风面板所受到的总的平均沙粒冲击力,见表4。根据测量结果,建筑物模型迎风面靠近内侧的位置所受到的沙粒冲击力大于外侧所受到的沙粒冲击力,迎风面沙粒冲击力分布规律与课题组前期测得风沙流场中建筑物迎风面风压分布规律相同,均表现为中心位置较边缘处更大^[25]。这说明在风沙流场中来流风对建筑物的绕流效应一定程度上影响了两相流中沙粒的运动状态和沙粒冲击力于分布情况。

2.4 测量结果对比与分析

为了更直观的反映MFC传感器对沙粒冲击力测量结果的准确性,采用下式计算MFC测力结果与天平测力结果之间的误差:

$$\delta = \frac{F_p - F_s}{F_s} \times 100\% \quad (32)$$

式中, δ 表示误差率; F_s 表示测力天平所测到的沙粒冲击力(N); F_p 表示MFC测到的沙粒冲击力(N),计算结果见表5。

在风沙风场中,MFC传感器测得的沙粒冲击力结果与测力天平的结果总体相差在-4.72%至5.80%之间,平均相差0.536%,标准差3.474%;迎风面所受沙粒冲击力之和相差在-1.67%至2.14%之间,平均误差0.757%,标准差1.276%,总体上两种测力试验结果基本吻合。导致误差出现的原因可能有以下几个方面:建立沙粒运动模型过程中为了简化计算忽略了沙粒摩擦力影响;实际情况下沙粒物理性质具有非常大的离散性,沙子的弹性恢复系数取固定值会造成一定影响。

表4 MFC传感器测得迎风面平均沙粒冲击力

Table 4 Average sand impact force on the windward side measured by MFC

单位:(10^{-3} N)

| 风速 | 位置 | 0.5孔 | | | 1孔 | | | 2孔 | | |
|--------|----|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | | 外侧 | 内侧 | 合力 | 外侧 | 内侧 | 合力 | 外侧 | 内侧 | 合力 |
| 9 m/s | 1 | 0.451 | 0.487 | 0.938 | 1.814 | 1.963 | 3.778 | 2.738 | 2.834 | 5.572 |
| | 2 | 0.909 | 1.011 | 1.920 | 3.122 | 3.223 | 6.345 | 6.463 | 6.988 | 13.451 |
| | 3 | 2.884 | 3.005 | 5.889 | 6.392 | 6.765 | 13.156 | 10.515 | 10.673 | 21.189 |
| | 4 | 5.518 | 6.016 | 11.534 | 10.542 | 11.327 | 21.869 | 17.145 | 19.268 | 36.413 |
| | 合计 | 9.763 | 10.519 | 20.281 | 21.870 | 23.278 | 45.148 | 36.861 | 39.764 | 76.625 |
| 11 m/s | 1 | 3.387 | 3.791 | 7.178 | 7.486 | 8.265 | 15.751 | 12.260 | 13.457 | 25.718 |
| | 2 | 3.827 | 4.468 | 8.295 | 11.930 | 13.099 | 25.028 | 20.847 | 22.768 | 43.615 |
| | 3 | 8.409 | 9.034 | 17.443 | 19.103 | 20.218 | 39.321 | 36.899 | 39.104 | 76.003 |
| | 4 | 11.723 | 12.282 | 24.005 | 22.703 | 26.055 | 48.758 | 39.652 | 44.009 | 83.661 |
| | 合计 | 27.346 | 29.574 | 56.920 | 61.222 | 67.638 | 128.859 | 109.658 | 119.339 | 228.997 |
| 13 m/s | 1 | 9.282 | 10.601 | 19.884 | 16.971 | 20.076 | 37.047 | 31.755 | 34.293 | 66.048 |
| | 2 | 9.849 | 11.160 | 21.009 | 20.630 | 23.944 | 44.575 | 33.845 | 38.306 | 72.151 |
| | 3 | 9.616 | 10.499 | 20.115 | 20.173 | 21.757 | 41.930 | 42.680 | 46.270 | 88.950 |
| | 4 | 11.568 | 12.671 | 24.239 | 24.024 | 27.257 | 51.281 | 42.531 | 50.098 | 92.629 |
| | 合计 | 40.315 | 44.931 | 85.246 | 81.799 | 93.034 | 174.833 | 150.812 | 168.966 | 319.778 |

表5 压电纤维片测力结果的误差

Table 5 Percentage error of the result measured by MFC

| 高度 | 9 m/s | | | 11 m/s | | | 13 m/s | | |
|----|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 0.5孔/% | 1孔/% | 2孔/% | 0.5孔/% | 1孔/% | 2孔/% | 0.5孔/% | 1孔/% | 2孔/% |
| 1 | 3.54 | 2.54 | -1.70 | 3.57 | 4.05 | -3.30 | 0.25 | -1.66 | -3.70 |
| 2 | 3.30 | -1.95 | -3.85 | -2.25 | 4.90 | 4.40 | 2.98 | 4.25 | 2.86 |
| 3 | -2.40 | -3.05 | 0.35 | -2.30 | -3.05 | -1.75 | -4.72 | -3.93 | 2.85 |
| 4 | 4.30 | 5.80 | 3.75 | 1.24 | 2.55 | -4.00 | 3.20 | 3.10 | 1.51 |
| 合计 | 2.14 | 1.70 | 1.00 | -0.10 | 1.38 | -1.67 | 0.49 | 0.59 | 1.05 |

3 结 论

本文采用MFC作为风沙冲击力传感器,建立了MFC传感器所受沙粒冲击力与其输出电压之间的数学模型,并通过风沙风洞试验检验该模型的准确性和其作为沙粒冲击力传感器的可行性,得到了以下结论:

(1)MFC传感器受到的单位时间沙粒平均冲击力与其所产生的单位时间平均电压之间存在相关关系,在数学模型上为过原点的正比例函数。

(2)MFC传感器所测得的沙粒冲击力结果与传统高频测力天平所测结果吻合良好,二者误差范围在-4.72%至5.80%,进一步说明了MFC传感器在测量沙粒冲击力方面具有良好的适用性和可行性。

(3)在风沙流场中,建筑物迎风面内侧所受到

的沙粒冲击力大于外侧所受到的沙粒冲击力,迎风面所受沙粒冲击力的分布与其建筑物表面风压力分布相关。

参考文献:

- [1] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2012.
- [2] Bagnold R A. The transport of sand by wind[J]. The Geographical Journal, 1937, 89(5): 409-438.
- [3] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design[M]. New York: John Wiley, 1996.
- [4] Zhang Z Q, Li H N, Li G, et al. The numerical analysis of transmission tower-line system wind-induced collapsed performance[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013: 413275.

- [5] Hagen L J. Soil aggregate abrasion by impacting sand and soil particles[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(3): 805-808.
- [6] Li Z S, Ni J R, Mendoza C. An analytic expression for wind-velocity profile within the saltation layer[J]. Geomorphology, 2004, 60(3/4): 359-369.
- [7] Yu K, Tafti D. Impact model for micrometer-sized sand particles[J]. Powder Technology, 2016, 294: 11-21.
- [8] 李正农,范晓飞,蒲鸥,等. 建筑物风沙流场与荷载的风洞试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(1): 152-158,182.
Li Z N, Fan X F, Pu O, et al. Wind tunnel test on wind-sand flow field and wind-sand load of buildings[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(1): 152-158, 182. (in Chinese)
- [9] 张智丹,纪松,张延松. 冲击载荷下PVDF和PZT压电材料的动态性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2008(2):65-69.
Zhang Z D, Ji S, Zhang Y S. Research of dynamic behavior of PVDF and PZT piezoelectric material under shock loading[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008(2):65-69. (in Chinese)
- [10] Chure M C, Wu L, Wu K K, et al. Power generation characteristics of PZT piezoelectric ceramics using drop weight impact techniques: Effect of dimensional size [J]. Ceramics International, 2014, 40(1): 341-345.
- [11] 蔺潇. 基于压电技术的降雨测量方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Lin X. Research on rainfall measurement method based on piezoelectric technology [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [12] 李佳,张弛,王柏林. 基于压电陶瓷的冰雹传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(7):106-109.
Li J, Zhang C, Wang B L. Design of hail sensor based on piezoelectric ceramics[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(7):106-109. (in Chinese)
- [13] 郑永军,马超,张艳超,等. 基于PVDF压电传感器的水滴冲击力检测系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增1):142-147.
Zheng Y J, Ma C, Zhang Y C, et al. Detection system of droplet impact force based on PVDF sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Sup1):142-147. (in Chinese)
- [14] Lin X, Zhou K, Zhang X, et al. Development, modeling and application of piezoelectric fiber composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(1): 98-107.
- [15] Jang J, Liu J F, Yue C P, et al. Development of self-contained sensor skin for highway bridge monitoring [C] //Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems. SPIE, 2006: 1291-1300.
- [16] Glushkov E, Glushkova N, Kvasha O, et al. Guided wave generation and sensing in an elastic beam using MFC piezoelectric elements: theory and experiment [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(16): 1617-1625.
- [17] Park S, Yun C B, Inman D J. A self-contained active sensor system for health monitoring of civil infrastructures [C] //SENSORS, 2006 IEEE. IEEE, 2006: 798-802.
- [18] Lu F, Lin X, Geng B, et al. Acoustic emission signal response of piezoelectric fiber composites [C] //2015 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA). IEEE, 2015: 273-276.
- [19] 范丽峰. 基于压电作动器MFC的柔性梁振动主动控制[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
Fan L F. Active vibration control of a flexible beam with piezoelectric actuator MFC[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [20] Matsushita H, Yoshioka H, Takahashi Y. A study on vibration control method of building structures using macro fiber composites[C] //Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2014. SPIE, 2014, 9057: 583-592.
- [21] Song G, Sethi V, Li H N. Vibration control of civil structures using piezoceramic smart materials: A review [J]. Engineering Structures, 2006, 28(11): 1513-1524.
- [22] 蔡振岩,钱建清. 碰撞时间的定量计算[J]. 大学物理, 1983(12):14-17.
Cai Z Y, Qian J Q. Quantitative calculation of collision time[J]. University Physics, 1983(12): 14-17. (in Chinese)
- [23] Haff P K, Anderson R S. Grain scale simulations of loose sedimentary beds: The example of grain-bed impacts in aeolian saltation[J]. Sedimentology, 1993, 40(2): 175-198.
- [24] Sezer N, Koç M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting [J]. Nano Energy, 2021, 80:105567.
- [25] 丛顺,李正农,刘增夕,等. 基于风洞试验的沙漠地区低矮建筑实测体型系数修正[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(4):918-935.
Cong S, Li Z N, Liu Z X, et al. Correction of measured shape coefficient of low rise buildings in desert area based on wind tunnel test[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(4):918-935. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)