

# PVDF 压电薄膜传感特性研究

丁贝贝<sup>1,2</sup>, 吴先梅<sup>1</sup>, 韩星辰<sup>1,2</sup>, 陈家熠<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 声学研究所 声场声信息国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜是一种压电高分子材料,它具有独特的压电效应,被广泛应用于振动测量等各个领域。但对于压电薄膜在受到外加应力时其输出特性的研究较少。该文理论分析了 PVDF 压电薄膜的传感机理和电路等效模型;然后利用 COMSOL 软件进行仿真;最后实验研究了 PVDF 压电薄膜在不同激励振幅、激励频率及外加应力下的动态响应。研究结果表明,压电薄膜输出信号的幅值与薄膜振幅成线性关系,与所受外加静态应力无关。

**关键词:** 聚偏氟乙烯(PVDF);压电效应;振动测量;COMSOL 仿真;动态响应

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.02.005

## Studies on Sensing Properties of PVDF Piezoelectric Films

DING Beibei<sup>1,2</sup>, WU Xianmei<sup>1</sup>, HAN Xingchen<sup>1,2</sup>, CHEN Jiayi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory on Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric thin film is a kind of piezoelectric polymer material. It has unique piezoelectric effect, and is widely used in vibration measurement and other fields. There are few reports on the output characteristics of piezoelectric thin films under applied stress. In this paper, the sensing mechanism and the equivalent circuit model of PVDF piezoelectric film are analyzed theoretically. And then the numerical model of piezoelectric film is simulated by COMSOL software. Finally, the dynamic responses of PVDF piezoelectric films with different excitation frequency, vibration amplitude and external stress are studied experimentally. The results show that the output signal amplitude of piezoelectric film has a linear relationship with the amplitude of the film, but not directly related to the external stress of the film.

**Key words:** polyvinylidene fluoride (PVDF); piezoelectric effect; vibration measurement; COMSOL simulation; dynamic responses

## 0 引言

聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜因 PVDF 具有较好的压电性能而备受关注。Kowbel 等各种压电材料进行了比较,结果表明,PVDF 压电薄膜的压电常数  $d_{31}$  远高于其他压电材料的  $d_{31}$ <sup>[1]</sup>。PVDF 压电薄膜质地柔软,质量轻,灵敏度高,响应快,频率范围宽等优点,使其成为广泛使用的新型智能传感器。同时 PVDF 压电薄膜可直接贴附在机件表面而不会影响机件的机械运动。压电薄膜很适用于需要大带宽和高灵敏度的应变传感应用。近年来,压电薄膜越来越多的应用于结构健康监测<sup>[2-4]</sup>、振动传感器<sup>[5]</sup>及力学传感器<sup>[6]</sup>等领域。对于压电薄膜在受到

外加应力时其输出特性的研究较少。因为本研究课题计划应用压电薄膜长度方向的传感特性进行相关测量,所以比较关注压电薄膜的安装方式及外部受力情况。等强度梁被较多的应用于 PVDF 压电薄膜的传感特性研究<sup>[4,7]</sup>。等强度梁实验系统能测量出压电薄膜在不同激励频率和振幅下的输出特性,但对于外加静态应力对于压电薄膜的影响无法测量。因此,我们设计和制作了一套实验装置,并开展了相关的实验研究。

本文理论分析了 PVDF 压电薄膜的传感机理和电路等效模型,利用 COMSOL 软件对压电薄膜进行了仿真,实验研究了 PVDF 压电薄膜在动态条

收稿日期:2017-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11674351)

作者简介:丁贝贝(1992-),男,安徽宿州人,硕士生,主要从事 PVDF 压电传感器的研究。通信作者:吴先梅,女,江苏新沂人,副研究员,主要从事超声检测、超声成像及超声相关应用的研究。E-mail: wuxm@mail.ioa.ac.cn。

件下的传感特性,包括压电薄膜在不同激励振幅、激励频率、外加应力下的输出特性。

## 1 PVDF 压电薄膜的传感机理

### 1.1 PVDF 压电薄膜的压电效应及压电方程

当 PVDF 压电薄膜被施加外力时,由于晶体内部的不对称性,正、负电荷的中心开始偏移,其上、下两个表面会产生极性相反,大小相等的电荷,可把它看成两极板上聚集异性电荷,中间为绝缘体的电容器,这种现象称为压电效应。当作为传感器时,我们主要考虑正压电效应与机电耦合系数的关系。PVDF 将外界的力学量转化成电信号输出。因为压电薄膜满足机械自由、电学短路的条件,所以压电薄膜满足第一类压电方程为

$$\mathbf{D}_m = \mathbf{d}_{mi} \boldsymbol{\sigma}_i + \boldsymbol{\varepsilon}_{mi}^T \mathbf{E}_n \quad (m, n = 1, 2, 3, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{D}_m$  为电位移矩阵,即面电荷矩阵;  $\mathbf{d}_{mi}$  为压电应变常数矩阵;  $\boldsymbol{\sigma}_i$  为应力矩阵;  $\boldsymbol{\varepsilon}_{mi}^T$  为介电常数矩阵的转置矩阵;  $\mathbf{E}_n$  为电场强度矩阵。

对于 PVDF 薄膜,极化方向为厚度方向,同时薄膜很薄,无法从侧面引出电极,也无外加电场,所以剪切力方向的压电常数都为 0,此时 PVDF 的压电方式简化为<sup>[8]</sup>

$$D_3 = d_{31} \sigma_1 + d_{32} \sigma_2 + d_{33} \sigma_3 \quad (2)$$

因为薄膜受力主要在长度方向,故式(2)又进一步简化为

$$D = d_{31} \sigma_1 \quad (3)$$

则产生的电荷为

$$Q = d_{31} \sigma_1 S = d_{31} E \varepsilon S \quad (4)$$

式中:  $E$  为薄膜的弹性模量;  $\varepsilon$  为应变;  $S$  为 PVDF 的表面积。

### 1.2 PVDF 压电薄膜的电路等效模型

PVDF 压电薄膜可等效为一个电荷源。压电薄膜产生的电荷须经过电荷放大器变成电压信号,然后才能进行采集。电荷放大器能将微弱的电荷信号转换为成正比的电压信号。PVDF 压电薄膜与电荷放大器连接的等效电路图如图 1 所示<sup>[8]</sup>。

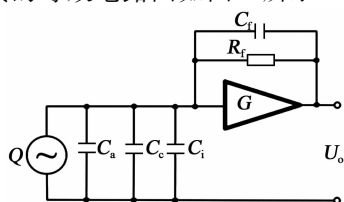


图1 压电薄膜与电荷放大器连接等效电路图

图 1 中,  $G$  为运算放大器的增益,  $C_c$  为电缆电容,  $C_a$  为压电薄膜的电容,  $C_i$  为放大器的输入电容,  $C_f$  为反馈电容,  $R_f$  为反馈电阻, 当反馈电阻很大时, 可视为开路, 由一般放大器的基本特性, 可求出电荷放大器的输出电压为

$$U_o = - \frac{GQ}{C_a + C_c + C_i + (1+G)C_f} \quad (5)$$

一般  $G$  很大, 故式(5)可进一步表示为

$$U_o = - \frac{Q}{C_f} \quad (6)$$

所以  $U_o$  与  $C_c$ 、 $C_i$  等无关, 而与  $C_f$  有关。当  $C_f$  确定的情况下,  $U_o$  与压电薄膜产生的电荷成正比, 而电荷又与薄膜的应变成线性关系, 故  $U_o$  与压电薄膜的应变成线性关系。

## 2 PVDF 特性 COMSOL 仿真及实验分析

### 2.1 COMSOL 仿真模型

利用 COMSOL 软件对 PVDF 压电薄膜进行建模仿真(见图 2)。图中,  $K$  为铜片长度方向上施加拉力。模型上层为压电薄膜, 下层为矩形铜片。压电薄膜厚 0.05 mm, 长 10 mm, 宽 5 mm。铜片厚 0.05 mm, 长 20 mm, 宽 5 mm。压电薄膜的下端面为零电势面, 在铜片下端面施加正弦力  $F = A \sin(2\pi ft + \varphi)$ , 其中,  $A$  为正弦力振幅,  $f$  为频率。

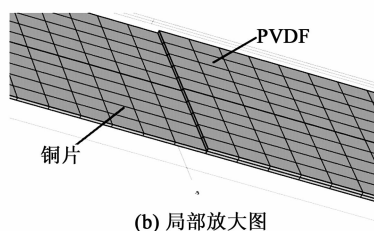
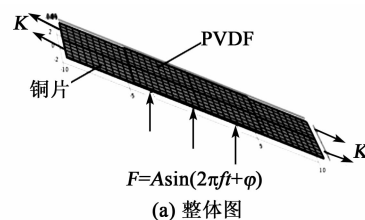


图2 COMSOL 仿真模型

### 2.2 实验系统

图 3 为本实验所用到的实验装置效果图。PVDF 压电薄膜紧紧的粘贴在薄铜带上, 薄铜带被固定块 1、2 紧紧夹持固定住, 并处于被拉紧的状态。固定块 1 可以在小范围内移动, 因铜片被夹紧, 铜片两端与固定块并无相对位移, 所以固定块的小范围移动将使铜片被拉长或缩短, 铜片所受应力也随之

变化,紧紧粘贴于铜片上的 PVDF 压电薄膜也随着铜片伸长或缩短承受外加应力的变化,其应变也随外加应力的改变而相应地增大或减小。因此,通过移动固定块 1 可改变压电薄膜承受外加应力的大小。在铜片的下表面紧紧地压在一偏心轮上,偏心轮在电机的带动下可按一定速度旋转,偏心轮周期性的旋转相当于给压电薄膜一周期的正弦激励,改变偏心轮的偏心距离可以改变铜片和压电薄膜的振动幅度,改变偏心轮的转速可改变激励频率。实验时,将压电薄膜所得信号接入电荷放大处理电路,然后通过 NI 采集系统进行数据采集,进而进行数据处理,得到输出信号的幅值,如图 4 所示。

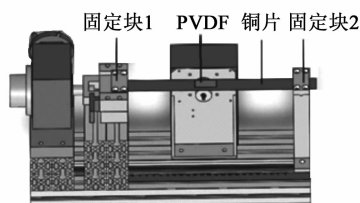


图 3 实验装置效果图

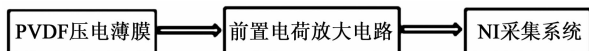


图 4 实验系统框图

## 2.3 COMSOL 仿真与实验结果分析

仿真模型中所用 PVDF 压电薄膜小于实验中所用压电薄膜,这是因为压电薄膜越大仿真计算量越大,所以采用较小的压电薄膜进行仿真。小模型的结果仍能代表大模型相关物理量的变化趋势,所以数值模拟结果与实验结果具有可比性。在计算中,采用力的幅值  $A$  来表示所施加正弦激励的大小;实验中,应用具有较大偏心度的偏心轮时激励幅值将增加,且偏心度  $d$  增加与激励幅值增加呈线性关系,所以为了方便即用  $d$  表示实验中的激励幅值,与计算中所施加的力的结果具有可比性。

### 2.3.1 激励频率对输出信号的影响

压电薄膜所受激励振幅和外加拉力不变,改变激励频率  $f$ ,测量输出信号的幅值。图 5 为激励频率与输出信号的关系图。由图可知,仿真情况下输出信号的幅值不受激励频率的影响。实验条件下,由于实验条件的限制,激励频率从 2 Hz 开始增加,由实验结果可看出,输出信号的幅值随着频率的增加而增加,但这种增加趋势随着频率的增加而变得缓慢,并逐渐稳定下来<sup>[9-10]</sup>。考虑到仿真条件的理

想化,总体和仿真结果一致。

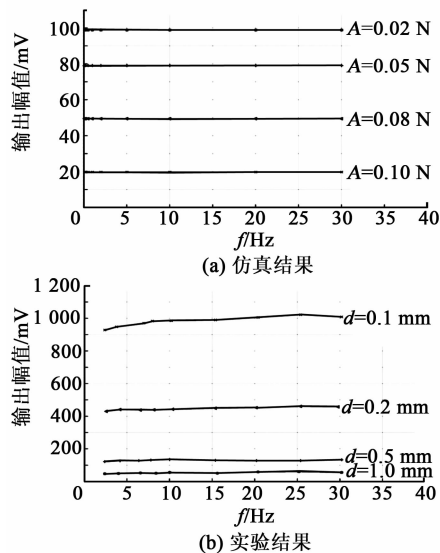


图 5 激励频率与输出信号关系图

### 2.3.2 激励振幅对输出信号的影响

薄膜所受外加拉力和激励频率不变,测量 PVDF 压电薄膜在不同激励振幅下,输出信号的幅值。图 6 为激励振幅与输出信号关系图。由图可知,仿真情况下,激励振幅与输出信号的幅值呈线性关系。随着激励振幅的增加,信号幅值也成比例增加。在实验条件下,输出信号的幅值与激励振幅亦成正比。根据压电方程可知,输出信号随着应变的增加而增加。同时由图还可看出,在不同的激励频率下,压电薄膜都具有很好的应变传感稳定性和重复性<sup>[10]</sup>。

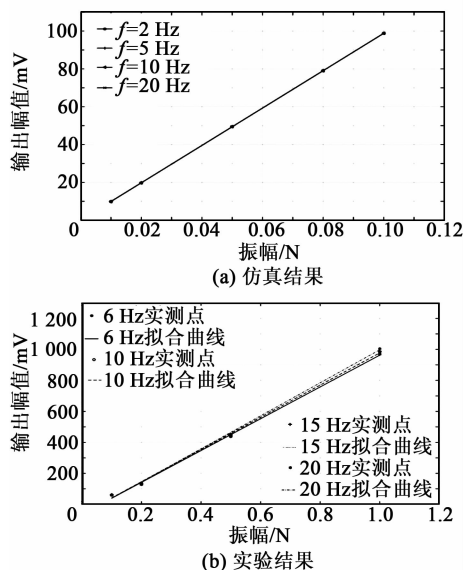


图 6 激励振幅与输出信号关系图

### 2.3.3 外加应力对输出信号的影响

压电薄膜所受激励振幅和激励频率不变,测量 PVDF 压电薄膜在不同应力下输出信号的幅值。图 7 为薄膜所受外加静态应力与输出信号关系图。由图可知,仿真情况下,外加应力对输出信号的幅值无影响。实验条件下,增大压电薄膜所受外加应力,其对应的输出信号幅值变化都很小,甚至不变化。综合仿真和实验结果可以认为,压电薄膜输出信号的幅值不受外加静态应力的影响。

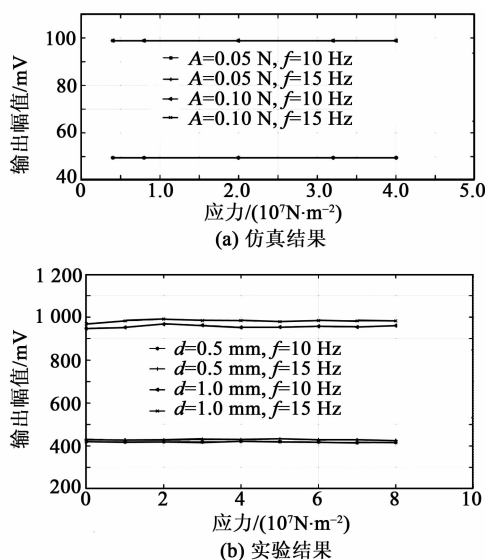


图7 外加应力与输出信号关系图

### 3 结束语

本文理论分析了 PVDF 压电薄膜的传感机理和电路等效模型;利用 COMSOL 软件对压电薄膜进行了仿真计算;设计并制作了一套实验装置对压电薄膜的传感特性进行了实验研究。主要研究了 PVDF 压电薄膜在不同激励振幅、激励频率、外加静态应力下的动态响应。研究结果表明,压电薄膜输出信号的幅值与薄膜振幅成线性关系,与所受外加静态应力无关。由于实验条件限制,只对 PVDF 薄膜输出特性进行了定性分析,精确的定量分析较难。本实验结果为进一步研究 PVDF 压电薄膜在振动测量领域中的应用提供了依据。

### 参考文献:

- [1] KOWBEL W, XIA X, CHAMPION W, et al. PZT/polymer flexible composites for embedded actuator and sensor applications[J]. Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering, 1999, 3675: 32-42.
- [2] 晏伯武. 基于 PVDF 薄膜传感器及其应用研究[J]. 数字技术与应用, 2014, 12(3): 107.  
YAN Bowu. Research on PVDF thin film sensor and its application[J]. Digital Technology and Application, 2014, 12(3): 107.
- [3] 杜彦良, 宋颖, 孙宝臣. PVDF 压电薄膜结构监测传感器应用研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(1): 1-4.  
DU Yanliang, SONG Ying, SUN Baochen. Application of PVDF piezoelectric film structure monitoring sensor [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19(3): 1-4.
- [4] 具典淑, 周智, 欧进萍. PVDF 压电薄膜的应变传感特性研究[J]. 功能材料, 2004, 35(4): 450-452.  
JU Dianshu, ZHOU Zhi, OU Jinping. Study on strain sensing characteristics of PVDF piezoelectric thin film [J]. Journal of Functional Materials, 2004, 35(4): 450-452.
- [5] 王术新, 李以哲. PVDF 传感器的设计及在振动测量中的应用[J]. 压电与声光, 2004, 26(5): 374-376.  
WANG Shuxin, LI Yizhe. PVDF sensor design and application in vibration measurement[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2004, 26(5): 374-376.
- [6] 卢凯. 基于 PVDF 的柔性压力传感器的制备与性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [7] 时璐. 弧形 PVDF 传感器的灵敏度研究与制作[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [8] 叶湘滨, 熊飞丽, 张文娜, 等. 传感器与测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 179-180.
- [9] 白石. PVDF 动态应变感知特性及其结构监测应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [10] 朱金海. PVDF 压电薄膜及其传感器的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.