

# 靶标表面压力传感器动态特性影响因素分析

徐浩鹏 孔德仁 王传志

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

**摘要:**为了提高传感器测量准确度以便能更好的评估武器毁伤能力,利用分形理论分析了预紧力与接触刚度的关系,计算获得了各元件间的接触刚度,并通过建立传感器动力学模型得到了各影响因素与传感器动态特性的关系,模型结果表明,增大预紧力、减少 PVDF 膜的面积和降低 PVDF 膜、电极、盖板 PET 膜的厚度能有效提高传感器动态特性,最后,使用 ANSYS 有限元分析软件与激波管标定实验对模型准确度进行验证,在给定参数的情况下,ANSYS 仿真出的固有频率大小为 71.069 kHz,激波管标定实验结果为 91.073 kHz,与理论模型计算结果 65.277 kHz 相仿,证明了模型可行性。

**关键词:**固有频率;接触刚度;预紧力;模态分析;激波管校准

**中图分类号:** TJ03;TN03 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 410

## Analysis of factors influencing the dynamic characteristics of target surface pressure sensors

Xu Haopeng Kong Deren Wang Chuanzhi

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to improve the measurement accuracy of sensors and better evaluate the damage ability of weapons, this paper uses fractal theory to analyze the relationship between preload force and contact stiffness, calculates the contact stiffness between various components, and establishes a sensor dynamic model to obtain the relationship between various influencing factors and sensor dynamic characteristics. The model results show that increasing preload force, reducing the area of PVDF film, and reducing the thickness of PVDF film, electrode, and cover plate PET film can effectively improve the dynamic characteristics of sensors. Finally, the accuracy of the model is verified using ANSYS finite element analysis software and shock tube calibration experiments. Under given parameters, the natural frequency simulated by ANSYS is 71.069 kHz, and the shock wave is generated. The experimental result of tube calibration is 91.073 kHz, which is consistent with the theoretical model calculation result of 65.277 kHz, proving the feasibility of the model.

**Keywords:** intrinsic frequency; contact stiffness; preload; modal analysis; excitation tube calibration

### 0 引言

靶标表面冲击波压力的准确测量对于评价武器毁伤能力以及目标易损性具有重要意义,而选择正确的传感器是准确测量压力的关键。压力传感器敏感元件的材料通常为压电晶体和压电薄膜,现阶段大部分地表反射压和自由场压力测试使用美国 PCB PIEZOTRONICS 公司生产的压电式压力传感器,其敏感元件材料为压电晶体,具有较高的测量准确性和稳定性,并且响应迅速,占据了大量的市场份额,但在测量特殊靶标表面的压力时,需要设计

特定的工装才能安装,不仅成本高、安装麻烦,并且压电晶体制成的传感器纵向体积较大,安装进靶标会破坏靶标结构<sup>[1]</sup>,对测量结果造成影响,相对而言,以压电薄膜制成的传感器纵向尺寸较小、灵敏度较高,更加适合测量靶标表面压力。在压电薄膜传感器的研究上,范志强等<sup>[2]</sup>通过几种典型试验,分析了结构表面测量中压电薄膜的安装技术及界面两侧介质属性对压力测试结果的影响,发现结构表面刚度过低会使压电薄膜产生横向效应从而影响测量结果。王永强等<sup>[3]</sup>介绍了 PVDF 薄膜传感器的制作过程,并对封装用的粘结剂以及外保护层进行了激波管的对比试

验,考察封装材料对 PVDF 薄膜传感器动态性能的影响。本文将设计一款薄膜压力传感器用于测量靶标表面压力,要求其安装方便、对靶标表面结构破坏小、准确度高、成本低。

爆炸场冲击波压力时程是一个瞬态变化的过程,根据压力信号的能量谱分析,信号的有效频率为 0~40 kHz,为了更好地响应信号的变化、防止测量出现失真,传感器的固有频率必须达到信号频带的 4~5 倍<sup>[4]</sup>,因此用于测量的传感器必须拥有较高的固有频率。传感器固有频率主要由其自身结构、材料、预紧力等因素决定,本文通过建立传感器的动力学模型探究各个因素与其动态特性间的关系,分析传感器结构优化方法,并利用 ANSYS 有限元分析软件以及激波管标定的方法对模型结果进行验证。

### 1 薄膜压力传感器动态特性分析

#### 1.1 传感器工作原理

相较于其他压电材料,PVDF 具有高灵敏度、宽工作温度范围、耐磨性强、低密度、易加工等优点,但因为横向效应的影响<sup>[1]</sup>,其对测量物表面刚度要求较高。为了避免横向效应对测量结果产生影响,设计了传感器如图 1、2 所示,传感器包括上盖、塑胶壳、底座和敏感元件几个部分,敏感元件的电极材料为银,压电薄膜材料为 PVDF,使用 PET 膜进行绝缘。

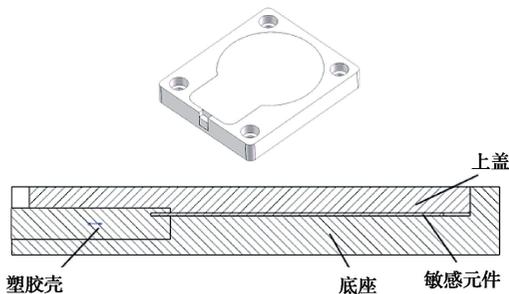


图 1 传感器结构

Fig. 1 Sensor structure diagram



图 2 敏感元件简图

Fig. 2 Schematic diagram of sensitive components

当爆炸冲击波作用于传感器上盖时,压力并没有全部传递到敏感元件上,而是通过塑胶壳进行了分载,假定作用在上盖的载荷为  $F$ ,传递至敏感元件的载荷为  $F_a$ ,塑胶壳分载了  $F_b$ ,根据传感器结构(图 1、2),将传感器各元件等效为理想弹簧,建立静力学模型如图 3 所示。PVDF 受

到载荷  $F_a$  的作用后产生电荷  $Q$ ,电荷经过外接的放大电路变为电压  $U$ ,载荷  $F$  与电压  $U$  的关系如式(1)所示,可以看出载荷  $F$  与电压  $U$  成线性关系,通过测量电压的大小即可计算出载荷大小。

$$U = \alpha \beta d F \tag{1}$$

式中: $k_0 \sim k_6$  分别为上盖、塑胶壳、PET 膜 1、银电极 1、PVDF 薄膜、PET 膜 2、银电极 2 的等效刚度。 $\alpha$  为分载系数, $d$  为 PVDF 的压电常数, $\beta$  为放大电路的放大系数。

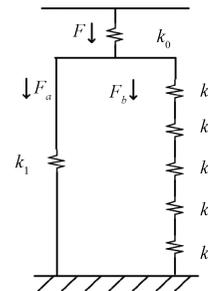


图 3 传感器静力学模型

Fig. 3 Sensor static model

#### 1.2 传感器动力学模型

为了进一步获得传感器固有频率等动态特性,根据弹性体的动力学等效原理,引入质量、刚度、阻尼等量,将传感器的每一部分近似等效为弹簧质量系统,传感器的整体动力学模型可以由各元件连接而成,建立传感器的动力学模型,如图 4 所示。

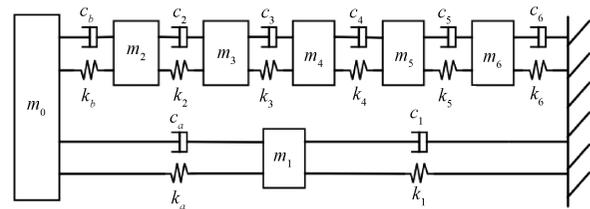


图 4 传感器动力学模型

Fig. 4 Sensor dynamics model

图 4 中, $m_0 \sim m_6$  分别为上盖、塑胶壳、PET 膜 1、银电极 1、PVDF 薄膜、PET 膜 2、银电极 2 的等效质量, $c_a, c_b$  和  $c_1 \sim c_6$  分别为上盖 a 部分、上盖 b 部分、塑胶壳、PET 膜 1、银电极 1、PVDF 薄膜、PET 膜 2、银电极 2 的等效阻尼, $k_a, k_b$  和  $k_1 \sim k_6$  为各元件的等效刚度。上盖板被分为 a、b 两个部分,分别代表与塑胶壳以及敏感元件的接触部分。

元件自身刚度  $k_{ei}$ 、等效质量  $m_i$  以及等效刚度  $k_i$  公式为:

$$\begin{cases} k_{ei} = \frac{E_i S_i}{h_i} \\ m_i = \frac{m_{ei}}{3} \\ k_i = \frac{k_{ei} \cdot k_{ij}}{k_{ei} + k_{ij}} \end{cases} \tag{2}$$

式中:  $E_i$  为各元件的弹性模量;  $S_i$  为各元件的截面面积;  $h_i$  为厚度;  $m_{ei}$  为各元件自身质量;  $k_{ij}$  为各元件与其下一个元件之间的接触刚度。

由式(2)可知,等效刚度主要由传感器各元件自身刚度与各元件间的接触刚度决定,一个元件的等效刚度可以看作其自身刚度与该元件同下一个元件间接触刚度的串联<sup>[5]</sup>,  $k_c, k_d, k_e, k_f, k_g$  为各部分的自身刚度,  $k_{cd}, k_{de}, k_{ef}, k_{fg}, k_{gh}$  为各部分间的接触刚度( $h$  为与 PET2 接触的底座),可以得到传感器敏感元件的等效刚度  $k$  为:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_e} + \frac{1}{k_f} + \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_{cd}} + \frac{1}{k_{de}} + \frac{1}{k_{ef}} + \frac{1}{k_{fg}} + \frac{1}{k_{gh}} \quad (3)$$

经上述分析可以发现,接触刚度的大小对等效刚度影响很大,接触刚度的影响因素包括各元件接触面的表面粗糙度、表面清洁度、预紧力<sup>[6]</sup>、元件材料等,其中,预紧力和元件表面形貌为主要影响因素。对传感器元件添加适合的预紧力能有效的增加各元件的接触面积,提高传感器固有频率等动态特性。目前,获得接合面接触刚度的方法主要采用分形理论。

结合面的接触刚度受粗糙表面的微观形貌和变形影响。根据分形理论可知,元件的粗糙表面与其整体宏观轮廓相似,未变形的微凸体形貌可以表示为:

$$z(x) = G^{D-1} l^{2-D} \cos\left(\frac{\pi x}{l}\right), \quad -\frac{l}{2} < x < \frac{l}{2} \quad (4)$$

式中:  $z(x)$  为微凸体轮廓高度;  $x$  为微凸体轮廓的位移;  $D$  为分形维数,用以度量分形体的复杂性和不规则性;  $G$  为尺度系数,用以表征函数  $z(x)$  的振幅;  $l$  为接触长度。

微凸体轮廓如图 5 所示,其最高点  $\delta$  如下:

$$\delta = G^{D-1} l^{2-D} \quad (5)$$

根据曲率半径的定义可得微凸体曲率半径  $R$  为:

$$R = \frac{a^{D/2}}{\pi^2 G^{D-1}} \quad (6)$$

式中:  $a$  为接触面积,微观条件下,  $a$  与  $l$  的关系可视为  $l = a^{1/2}$ , 根据 Hertz 接触理论,当两个表面发生接触时,微凸体的弹塑性变形临界点变形量  $\delta_c$  为:

$$\delta_c = \left(\frac{P_m}{2E}\right)^2 \frac{a^{D/2}}{G^{D-1}} \quad (7)$$

式中:  $P_m$  为最大接触压力,  $P_m = \beta H$ ,  $\beta$  为临界系数,根据球压痕试验可得  $\beta = 0.6$ <sup>[5]</sup>,  $H$  为两个接触面中较软面材料的莫氏硬度;  $E$  为复合弹性模量,由两个接触面的弹性模量和泊松比决定。

$$E = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (8)$$

当两个接触面刚接触时,微凸体处于塑性变形阶段,随着变形量增大,微凸体达到变形临界点,随后进入弹性变形阶段<sup>[7]</sup>。

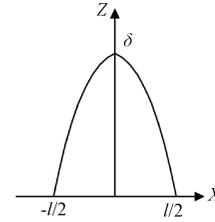


图 5 微凸体轮廓示意图

Fig. 5 Schematic diagram of micro convex body contour

联立式(6)、(7),可得临界状态下的接触面积为:

$$a_c = G^2 \left(\frac{2E}{P_m}\right)^{\frac{2}{D-1}} \quad (9)$$

根据 Hertz 接触理论,在塑性变形阶段,微凸体所受载荷  $F_p(a)$  为:

$$F_p(a) = a P_m \quad (10)$$

在弹性变形阶段,微凸体所承载荷  $F_e(\delta)$  为:

$$F_e(\delta) = \frac{4}{3} E R^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

当曲率半径  $R \gg \delta$  时,接触面积  $a$  与曲率半径  $R$  的关系为  $a = \pi R \delta$ , 将其代入式(11),可得:

$$F_e(a) = \frac{4\sqrt{\pi}}{3} E a^{\frac{3-D}{2}} G^{D-1} \quad (12)$$

微凸体接触变形服从的规律<sup>[8]</sup>为:

$$n(a) = |N(A > a)| = \frac{D}{2} \frac{a^{\frac{D}{2}}}{a^{\frac{D+2}{2}}} \quad (13)$$

设总载荷为  $F_z$ , 则有:

$$F_z = \int_0^{a_c} F_p(a) n(a) da + \int_{a_c}^{a_{\max}} F_e(\delta) n(a) da = \frac{D P_m a_{\max}^{\frac{D}{2}} a_c^{\frac{2-D}{2}}}{2-D} + \frac{4DE}{3\sqrt{\pi}(3-2D)} G^{D-1} a_{\max}^{\frac{D}{2}} \left(a_{\max}^{\frac{3-2D}{2}} - a_c^{\frac{3-2D}{2}}\right) \quad (14)$$

根据材料力学知识,在弹性变形阶段,接触刚度为单位载荷与单位变形量的比值,则微凸体的接触刚度  $k_n$  为:

$$k_n = \frac{dF_e(\delta)}{d\delta} = 2E(R\delta)^{\frac{1}{2}} = 2E\left(\frac{a}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

接合面法向接触刚度  $K_z$  为规律函数与单个微凸体接触刚度的积分,则有:

$$K_z = \int_{a_c}^{a_{\max}} k_n n(a) da = \frac{DE}{\sqrt{\pi}} a_{\max}^{\frac{D}{2}} \left(a_{\max}^{\frac{1-D}{2}} - a_c^{\frac{1-D}{2}}\right) \quad (16)$$

### 1.3 传感器动态参数计算

传感器动力学模型(图 4)是由惯性质量、刚度、阻尼组成的,微分方程为:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{f(t)\} \quad (17)$$

基于整个动力学模型推导出的结果如下：

$$\begin{cases} f_0(t) = m_0 \ddot{x}_0 + c_a(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + c_b(\dot{x}_0 - \dot{x}_2) + k_a(x_0 - x_1) + k_b(x_0 - x_2) \\ f_1(t) = m_1 \ddot{x}_1 - c_a(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + c_1 \dot{x}_1 - k_a(x_0 - x_1) + k_1 x_1 \\ f_2(t) = m_2 \ddot{x}_2 - c_b(\dot{x}_0 - \dot{x}_2) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_b(x_0 - x_2) + k_2(x_2 - x_3) \\ f_3(t) = m_3 \ddot{x}_3 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) - k_2(x_2 - x_3) + k_3(x_3 - x_4) \\ f_4(t) = m_4 \ddot{x}_4 - c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_5) - k_3(x_3 - x_4) + k_4(x_4 - x_5) \\ f_5(t) = m_5 \ddot{x}_5 - c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_5) + c_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_6) - k_4(x_4 - x_5) + k_5(x_5 - x_6) \\ f_6(t) = m_6 \ddot{x}_6 - c_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_6) + c_6 \dot{x}_6 - k_5(x_5 - x_6) + k_6 x_6 \end{cases} \quad (18)$$

式中： $f_0(t), f_1(t), \dots$  为各元件受到的合力； $m_0, \dots, m_6$  为各元件的等效质量； $c_a, c_b, c_1, \dots, c_6$  为各元件的等效阻尼； $k_a, k_b, k_1, \dots, k_6$  为各元件的等效刚度； $x_0, \dots, x_6$  为各元件的位移。

由于压电式压力传感器的阻尼较小<sup>[9]</sup>，并且在测量爆

炸冲击波时，冲击波作用时间极短，因此，阻尼对动力学模型的影响可以忽略不计，则传感器固有频率的计算方程为：

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (19)$$

结合式(17)和(18)，得到如下行列式：

$$\begin{vmatrix} k_a + k_b - m_0 \omega_n^2 & -k_a & -k_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_a & k_a + k_1 - m_1 \omega_n^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_b & 0 & k_2 + k_b - m_2 \omega_n^2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_2 & k_2 + k_3 - m_3 \omega_n^2 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_3 & k_3 + k_4 - m_4 \omega_n^2 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 - m_5 \omega_n^2 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 + k_6 - m_6 \omega_n^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (20)$$

利用 MATLAB 对式(19)进行求解，可以获得  $\omega$  的不同实根，其中最小的正数为传感器的一阶角频率（基频），再将基频除以  $2\pi$ ，就可以获得传感器的固有频率。

为了后续的仿真验证并制作实物进行激波管实验，选

择特定的传感器参数进行计算，数据如表 1 所示。假定各个元件间的形貌特征相同，由于上盖是通过胶水固定，预紧力较小，取预紧力  $F=300\text{ N}$ ，分形维数  $D=1.8$ ，尺度系数  $G=1 \times 10^{-9}$ ，结合式(19)计算得出传感器的固有频率为  $65.277\text{ kHz}$ 。

表 1 传感器结构参数

Table 1 Sensor structural parameters

元件名称	面积/mm <sup>2</sup>	厚度/mm	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	球压痕硬度
上盖 a 部分	284	2.2	7.85	210	0.3	5.2
上盖 b 部分	864	2.7	7.85	210	0.3	5.2
塑胶壳	279	3.2	0.93	1.1	0.42	5.5
PET 膜	480	0.06	1.38	3	0.35	2.4
银电极	390	0.025	10.5	80	0.32	2.5
PVDF 薄膜	390	0.13	1.78	2.5	0.33	5.8

### 1.4 动态特性影响因素分析

为了能进一步得到传感器各元件结构参数以及预紧力对其动态特性的影响，结合式(20)，保持其他参数不变，参数如表 1 所示，分别改变 PVDF 薄膜面积、PVDF 薄膜厚度、盖板厚度、电极厚度、PET 膜厚度、预紧力的大小，获得传感器固有频率变化规律，如图 6~11 所示。

由图 6 可知，传感器的固有频率随着 PVDF 薄膜面积的增大而减小，这样变化的原因为振动系统的质量阻尼模型中，固有频率与质量成反比，在其他条件相同的情况下，薄膜面积越大，质量便越高，固有频率也会相应的变低。由图 7~10 可知，传感器固有频率随着 PVDF 薄膜厚度、盖板厚度、电极厚度、PET 膜厚度的增大而减小，因为在

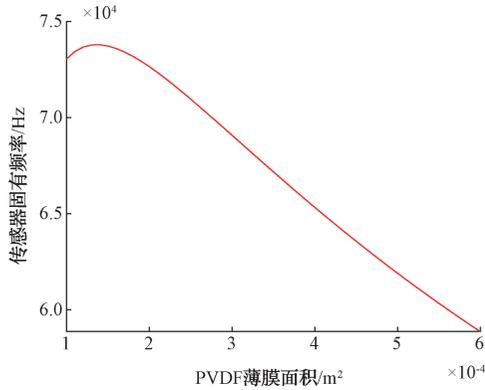


图6 PVDF 薄膜面积  
Fig. 6 PVDF film area

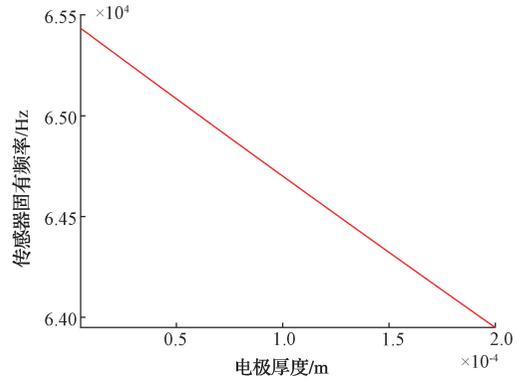


图9 电极厚度  
Fig. 9 Electrode thickness

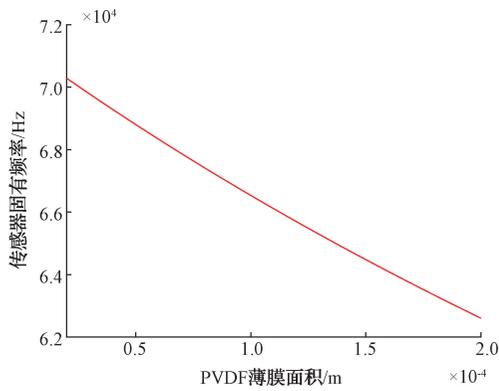


图7 PVDF 薄膜厚度  
Fig. 7 PVDF film thickness

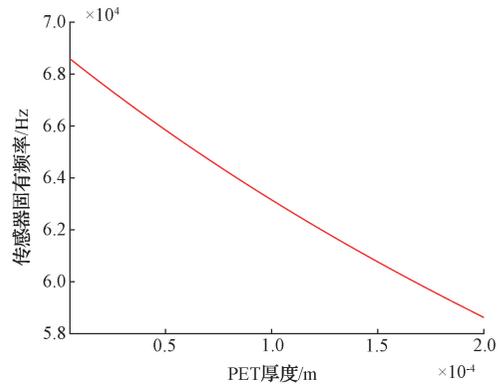


图10 PET 厚度  
Fig. 10 PET thickness

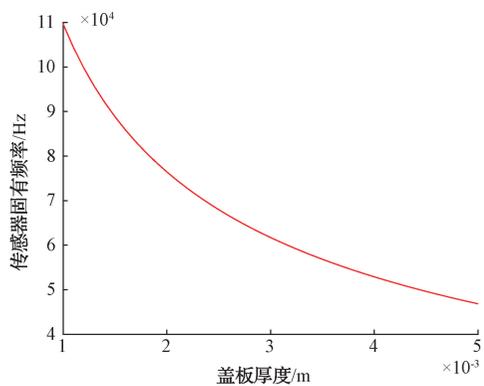


图8 盖板厚度  
Fig. 8 Cover plate thickness

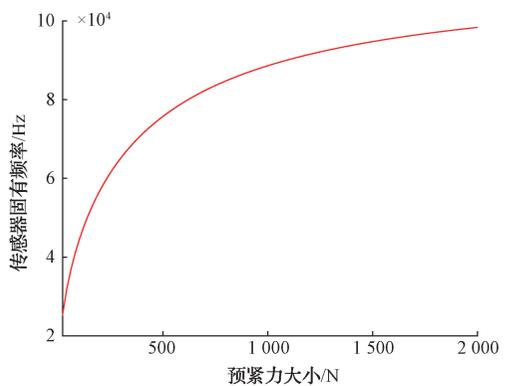


图11 预紧力大小  
Fig. 11 Size of preload force

相同条件下,更低的厚度可以获得更高的刚度,如式(2)所示,根据振动理论,刚度与固有频率成正比,所以厚度越小,固有频率越大。由图 11 可知,传感器固有频率随着预紧力的增大而增大,其原因为增大预紧力可以使传感器各元件的连接更加紧密,增加了传感器的整体刚度,根据振动理论,刚度与固有频率成正比,因此预紧力越大,固有频率

越高。在后续传感器优化中,可以减少 PVDF 薄膜面积、PVDF 薄膜厚度、盖板厚度、电极厚度、PET 膜厚度和增大预紧力来进一步提高传感器动态性能。

## 2 有限元分析软件验证

为了确保力学模型的准确性,利用 ANSYS 有限元分析软件中的模态分析部分对传感器模型进行验证。模态

分析是一种重要的分析方法,用于研究结构或系统在固有频率和振型下的响应,通过求解结构或系统的自由振动特性,以揭示其固有振动特性和动态响应行为<sup>[10-13]</sup>。

将传感器的底座视为刚体,获得传感器的前6阶振型,如图12~17所示。

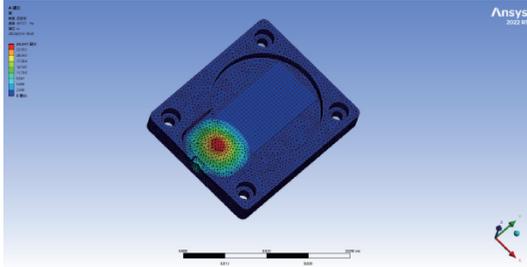


图12 一阶振型

Fig. 12 First order vibration mode

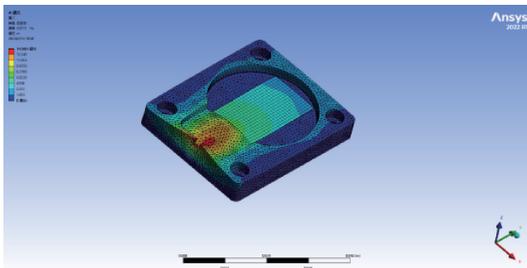


图13 二阶振型

Fig. 13 Second order vibration mode

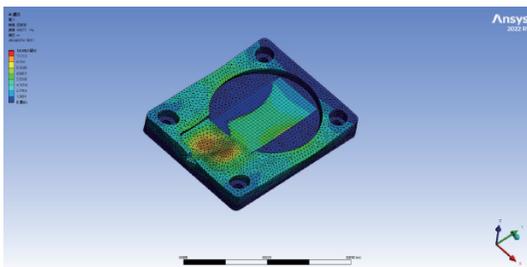


图14 三阶振型

Fig. 14 Third order vibration mode

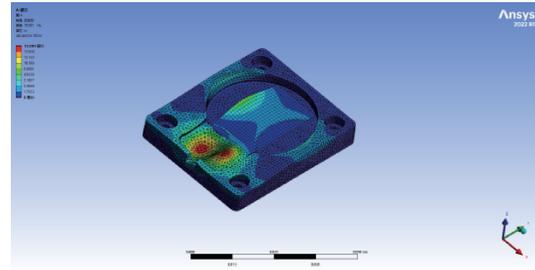


图15 四阶振型

Fig. 15 Fourth order vibration mode

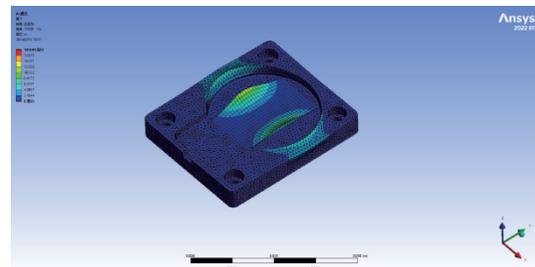


图16 五阶振型

Fig. 16 Fifth order vibration mode

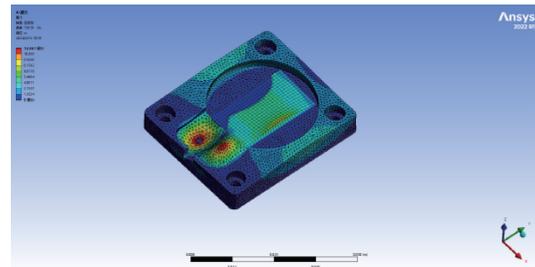


图17 六阶振型

Fig. 17 Sixth order vibration mode

图12~17的前6阶振型在z轴方向上的信息如表2所示,考虑到传感器主要受到z轴方向上的冲击波压力,只需要找到沿z轴方向上的振型即可,5阶振型在z轴方

表2 模态分析求解方案信息

Table 2 Modal analysis solution information

模态	固有频率/Hz	周期	振型参与系数	Ratio
1	49 736.8	$0.201\ 06 \times 10^{-4}$	$0.640\ 32 \times 10^{-2}$	0.681 046
2	62 873.0	$0.159\ 05 \times 10^{-4}$	$0.760\ 03 \times 10^{-4}$	0.080 837
3	66 411.2	$0.150\ 58 \times 10^{-4}$	$0.756\ 26 \times 10^{-8}$	0.000 804
4	70 207.2	$0.142\ 44 \times 10^{-4}$	$-0.849\ 28 \times 10^{-6}$	0.009 033
5	71 069.4	$0.140\ 71 \times 10^{-4}$	$0.940\ 20 \times 10^{-2}$	1.000 000
6	75 819.5	$0.131\ 89 \times 10^{-4}$	$-0.150\ 69 \times 10^{-7}$	0.001 603

向上的Ratio为1,表示其为传感器沿z轴压缩的振型,只受到z轴方向的力,此时传感器的固有频率为71.069 kHz,与理论模型计算结果相仿。

### 3 激波管标定

激波管是一种用于产生激波的设备,能提供快速的压

力脉冲和模拟冲击加载条件,帮助研究人员进行动态响应实验、材料性能测试以及气体动力学研究<sup>[14-16]</sup>。激波管主要由高压室和低压室两部分组成,在其间夹有一膜片,膜片一般是轻质但能承受高压的材料制成,如薄膜或薄金属片。使用机器持续对高压室充入高压气体进行加压,当压力达到临界点时,膜片破裂产生激波。通过处理传感器对激波响应时的数据,即可获得所需的传感器动态参数。

此次标定实验使用的激波管内壁厚度 101 mm,外壁厚度 110 mm,高压区长度 2.2 m,低压区长度 3.3 m,将待测的薄膜压力传感器安装至激波管的尾部,如图 18 所示,膜片选用厚度为 0.1 mm 的铝膜片。

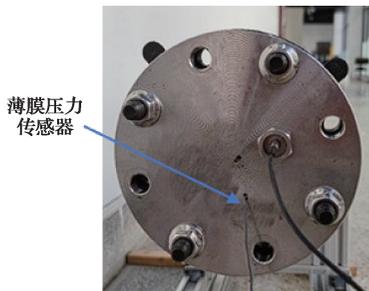


图 18 传感器安装位置

Fig. 18 Sensor installation position

如图 19 所示,使用空气压缩机为激波管装置加压,当压力达到一定限度时,铝膜片破碎产生激波,激波经过一段时间作用在激波管尾部的薄膜传感器,通过数据采集器测得的数据如图 20 所示。



图 19 激波管装置

Fig. 19 Shock tube device

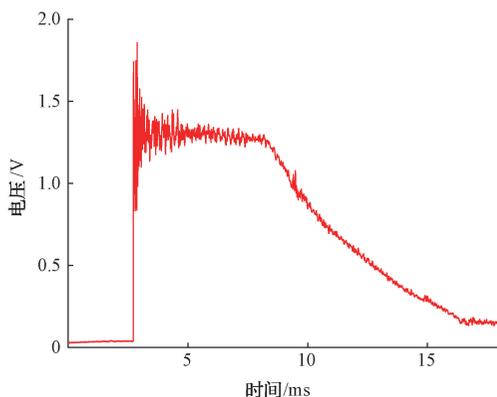


图 20 激波管标定数据

Fig. 20 Shock tube calibration data

使用微分法<sup>[17]</sup>对图 20 的数据进行转化,获得频域特性曲线如图 21 所示,可知传感器的固有频率为 91.073 kHz,与理论模型计算的结果有一定的差距,但考虑到现实传感器制作时预紧力不好控制,此次结果在误差范围内,可以证明理论模型的准确性。

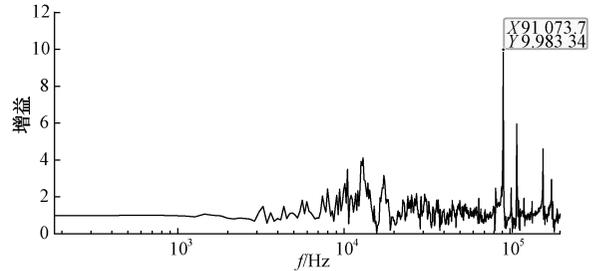


图 21 传感器频域特性

Fig. 21 Frequency domain characteristics of sensors

## 4 结论

本文基于分形理论,分析了预紧力大小对接触刚度的影响,计算获得了各元件间接触刚度。通过建立传感器的动力学模型,分析了各元件尺寸和预紧力对传感器动态特性的影响,得出了传感器固有频率与 PVDF 薄膜面积、PVDF 薄膜厚度、盖板厚度、电极厚度、PET 膜厚度呈负相关,与预紧力大小呈现正相关的结论。最后,确定了一个固定的传感器尺寸制作出实体,并通过 ANSYS 仿真软件和实体传感器的激波管试验验证了模型的可行性。在后续的传感器优化中,可以通过增加预紧力大小、减少 PVDF 膜的面积、降低 PVDF 膜、电极、盖板和 PET 膜的厚度来提高其动态性能。

## 参考文献

- [1] 范志强. PVDF 压力测量特性与水下爆炸近场多孔金属夹芯板动力响应的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2015.  
FAN ZH Q. Research on PVDF pressure measurement characteristics and dynamic response of near-field porous metal sandwich panels in underwater explosions [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [2] 范志强,马宏昊,沈兆武,等. PVDF 压力计在结构表面爆炸压力测量中的应用技术研究[J]. 兵工学报, 2014,35(S2):27-32.  
FAN ZH Q, MA H H, SHEN ZH W, et al. Research on the application technology of PVDF pressure gauge in measuring explosion pressure on structural surfaces [J]. Journal of Ordnance Engineering, 2014,35(S2): 27-32.
- [3] 王永强,肖英淋,刘长林. 封装材料对 PVDF 薄膜传感

- 器激波响应的影响[J]. 测试技术学报, 2015, 29(3): 256-260.
- WANG Y Q, XIAO Y L, LIU CH L. The influence of packaging materials on the shock response of PVDF thin film sensors [J]. Journal of Testing Technology, 2015, 29(3): 256-260.
- [4] 施宇成, 孔德仁, 徐春冬, 等. 爆炸场冲击波压力测量及其传感器技术现状分析[J]. 测控技术, 2022, 41(11): 1-10, 34.
- SHI Y CH, KONG D R, XU CH D, et al. Analysis of the current status of shock wave pressure measurement and sensor technology in explosion fields [J]. Measurement and Control Technology, 2022, 41(11): 1-10, 34.
- [5] 金雷. 晶片表面微观形貌对压电式力传感器性能影响规律研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- JIN L. Research on the influence of micromorphology of chip surface on the performance of piezoelectric force sensors [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [6] ZHAO G, XIONG Z L, JIN X, et al. Prediction of contact stiffness in bolted interface with natural frequency experiment and FE analysis[J]. Tribology International, 2018, 127: 157-164.
- [7] 杨红平, 傅卫平, 王雯, 等. 基于分形几何与接触力学理论的结合面法向接触刚度计算模型[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 102-107.
- YANG H P, FU W P, WANG W, et al. A calculation model for normal contact stiffness of joint surface based on fractal geometry and contact mechanics theory [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 102-107.
- [8] 张学良, 王南山, 温淑花, 等. 机械结合面切向接触阻尼能量耗散弹塑性分形模型[J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 43-49.
- ZHANG X L, WANG N SH, WEN SH H, et al. A fractal model for energy dissipation of tangential contact damping on mechanical joint surface [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(12): 43-49.
- [9] 杨聪. 爆炸冲击波动态测量压电式压力传感器研究[D]. 济南: 济南大学, 2020.
- YANG C. Research on piezoelectric pressure sensor for dynamic measurement of explosive shock waves [D]. Jinan: Jinan University, 2020.
- [10] 冯辉, 农权, 孟杰, 等. 基于 ANSYS 的云梯车梯臂模态分析[J]. 机械工程与自动化, 2023(6): 69-71.
- FENG H, NONG Q, MENG J, et al. Modal analysis of ladder arm of aerial ladder vehicle based on ANSYS [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2023(6): 69-71.
- [11] 张红, 张方, 蒋祺, 等. RV 减速机关键件及整机固有模态分析[J]. 电子测量技术, 2018, 41(21): 54-58.
- ZHANG H, ZHANG F, JIANG Q, et al. RV deceleration mechanism key components and inherent mode analysis of the whole machine [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(21): 54-58.
- [12] 李元, 张昊展, 唐晓初. 基于多模态数据全信息的概率主成分分析故障检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 75-85.
- LI Y, ZHANG H ZH, TANG X CH. Research on probabilistic principal component analysis fault detection based on multimodal data with full information [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 75-85.
- [13] 陈磊磊, 贺旭东, 陈怀海. 基于接触分析的螺栓连接刚度计算及模态验证[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(3): 45-51.
- CHEN L L, HE X D, CHEN H H. Stiffness calculation and modal verification of bolted connections based on contact analysis [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(3): 45-51.
- [14] 田俊宏, 张大有, 戴宜霖, 等. 动态压力校准技术现状分析[J]. 宇航计测技术, 2022, 42(2): 9-14.
- TIAN J H, ZHANG D Y, DAI Y L, et al. Analysis of the current status of dynamic pressure calibration technology [J]. Aerospace Measurement Technology, 2022, 42(2): 9-14.
- [15] 李强, 王中宇, 王卓然, 等. 压力传感器激波管校准条件下的动态参数估计[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(7): 1223-1230.
- LI Q, ZHANG ZH Y, WANG ZH R, et al. Dynamic parameter estimation under pressure sensor shock tube calibration conditions [J]. Journal of Beihang University, 2015, 41(7): 1223-1230.
- [16] 李永生, 姚贞建, 丁义凡. 激波管反射阶跃压力上升时间高精度估计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 10-18.
- LI Y SH, YAO ZH J, DING Y F. High precision estimation of the rise time of shock tube reflection step pressure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 10-18.
- [17] 杨凡, 孔德仁, 姜波, 等. 基于激波管校准的冲击波压力传感器动态特性研究[J]. 南京理工大学学报, 2017, 41(3): 330-336.
- YANG F, KONG D R, JIANG B, et al. Research on dynamic characteristics of shock wave pressure sensors based on shock tube calibration [J]. Journal

of Nanjing University of Technology, 2017, 41(3):  
330-336.

作者简介

徐浩鹏, 硕士研究生, 主要研究方向为动态压力传感

器设计。

E-mail: xhpnjust@163.com

孔德仁(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为爆炸  
动态参量测试, 测控技术及仪器、现代传感器技术及系统。

E-mail: derenkong@hotmail.com