

## 1. 实验原理

### (1) 薄膜振动及空气影响影响

将薄膜结构安装支架上，使用电机对薄膜四边施加一定的张力，并将其放入在真空罐。通过空气压缩机调节真空罐内的真空度，获得真空环境。利用激振器扫频激励薄膜结构，同时使用扫描式激光测振系统通过真空罐的透明观察窗实现进行薄膜振动测量，并通过模态分析软件得出薄膜的频率特性和振动模态。通过调节真空罐的真空压力，最终获取不同真空度下的张拉膜结构模态频率和规律。并且可以确定气压对膜结构振动频率的影响因子  $\alpha$ 。

矩形张拉膜结构的振动可以认为是二维波动齐次定解问题：

$$\begin{cases} u_{tt} = \sigma^2(N_x^0 u_{xx} + N_y^0 u_{yy}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u|_{x=0} = u|_{x=l} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u|_{y=0} = u|_{y=l} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中： $u = u(x, y, t)$  为波动位移，矩形膜的边长为  $l$ ， $\sigma^2 = 1/\rho h$ ， $\rho$  为膜的体密度； $h$  为膜的厚度， $N_x^0$  为方向  $x$  的线预拉力， $N_y^0$  为方向  $y$  的线预拉力

利用分离变量法定义：

$$u(x, y, t) = X(x)Y(y)T(t) \quad (4)$$

由于  $X(x) \neq 0$ ， $Y(y) \neq 0$  且  $T(t) \neq 0$

记常数  $\frac{X''(x)}{X(x)}$  为  $-a$ ， $\frac{Y''(y)}{Y(y)}$  为  $-b$

既得

$$T''(t) + (N_x^0 a + N_y^0 b) \sigma^2 T(t) = 0 \quad (5)$$

$$\begin{cases} X''(x) + aX(x) = 0 \\ X(0) = X(l) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Y''(y) + bY(y) = 0 \\ Y(0) = Y(l) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

求解可得

$$a_n = \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

$$b_m = \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

将常数值  $a_n$  和  $b_m$  代入式 (5)，有

$$T_{nm}''(t) + \left(N_x^0 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 + N_y^0 \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2\right) \sigma^2 T(t) = 0 \quad (10)$$

由此可得该膜振动的模态频率为

$$\omega_{nm}^2 = \sigma^2 \left[ N_x^0 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 + N_y^0 \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 \right] \quad (n = 1, 2, 3, \dots, m = 1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

采用附加质量法来估算空气环境下的矩形膜振动频率的方法：

设双向张拉矩形膜的  $M_{air}$  也为气压影响因子，即：

$$M_{air} = \alpha P \quad (12)$$

其中， $P$  为气压。

根据附加质量法的理论，空气阻力效应可以用一个附加质量项表示，那么考虑空气阻力效应的膜结构自振频率表达式如下：

$$f_{mn\_air} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{mn}}{M + M_{air}}} \quad (13)$$

$$\text{其中, } K_{mn} = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 N_x^0 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 N_y^0, \quad M = \rho h$$

由此可以计算不同真空度下膜结构的各阶固有频率。

所以，通过实测不同真空度下膜结构的各阶固有频率，就可以计算出气压影响因子  $\alpha$ 。

这样可以对不同材料和厚度规格薄膜的气压影响因子进行测量。

## (2) 测试系统组成

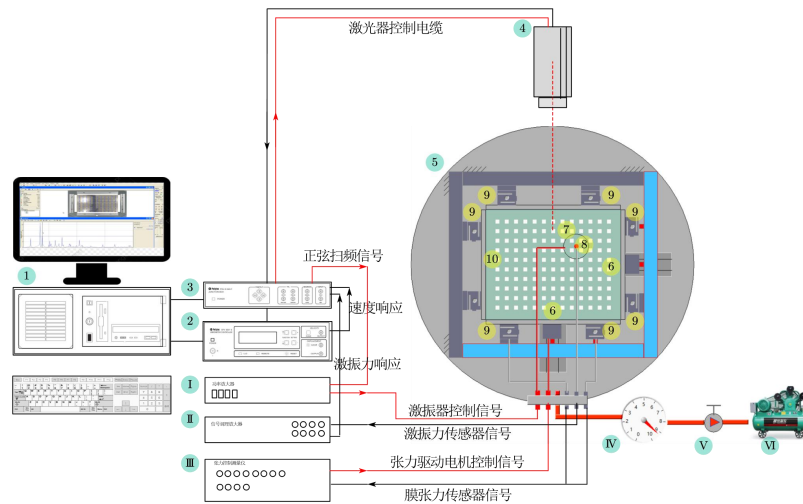


图 1 测试系统组成

说明：

1. 激光采集控制主机；2. 激光控制器；3. 激光接口箱；4. 激光头；5. 真空罐；6. 膜张力加载电机；7. 激振器；8. 激振力传感器；9. 膜张力传感器；10. 膜结构；I. 功率放大器；II. 电荷放大器；III. 加载电机测控仪；

## (3) 激光多普勒测振原理

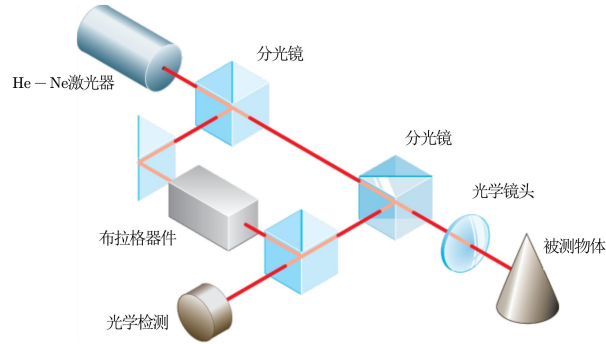


图 2 激光多普勒激光测振原理

激光多普勒测振仪原理是基于光学干涉和多普勒频移效应。其核心是一台高精度激光干涉仪和一台信号处理器。高精度激光干涉仪内的 He-Ne 激光器发出的偏振光(假设频率  $F_0$ )由分光棱镜分出两路,一路测量光,一路参考光。参考光通过声光调制器具有一定频移( $F$ ),测量光被聚焦到被测物体表面,物体振动引起测量光的频移( $f = 2v/\lambda$ )。系统收集反射光并与参考光汇聚在传感器上,这样两束光在传感器表面产生干涉,干涉信号的频率为  $F_0 + F + f$ ,携带了被测物体的振动信息,信号处理器将多普勒频移信号转换为物体振动的速度和位移信号。

假设两束光强分别  $I_1$  和  $I_2$  的相干光束相互重叠,干涉条件:

$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos[2\pi(f_1 - f_0)/\lambda]$ 。传感器通过高通滤波,即可获得强度变化率  $f_1 - f_2$  即  $\Delta f$ ,在传感器表面产生干涉信号,而干涉信号的频率  $\Delta f$  与频移效应有关。

多普勒频移:  $\Delta f = 2v/\lambda$ , 即  $\Delta f$  与速度  $v$  成正比变化。

$$U = k \cdot \Delta f = 2kv/\lambda \quad (k \text{ 为常数})$$

$$\text{令 } k' = 2k/\lambda, \text{ 则 } v = k'U$$

$k'$  为标定值(校准值),当校准值  $k' = 1\text{mm/s/V}$ ,测得速度值就是电压值。

结论:输出电压与振动速度成正比,也就是说被测对象的振动信息可以用电压信号表示。

#### (4) 模态测试和分析原理:

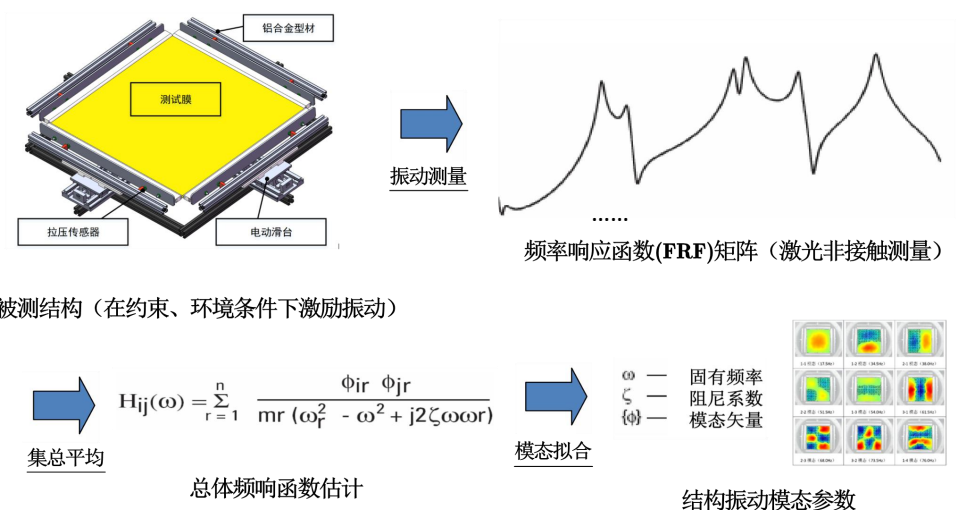


图 3 模态测试原理

当被测膜结构在一定约束、张力和真空环境条件下激励振动，利用激光测振系统非接触测量膜面各点的振动信号，与激振器激励信号求取各测点的频响应函数，通过集总平均方式得到总体频响应函数，然后经过总体频响应函数估计，使用峰值拾取等模态拟合方法获取膜结构的各阶固有频率，并计算得到相应的模态向量和振型。

## 2. 核心要素仿真度

虚拟实验核心要素仿真度从实验仪器设备和实验场景、实验过程、参数设置、测试和分析处理、结果显示等各实验环节都具备了很强的真实感，让学生得到真实实验体念。

- (1) 实验仪器设备和实验场景、测试仪器的仿真，仿真度达到 95%。



图 4 实验室整体的实验场景

- (2) 实验过程的真实感，如真空罐开盖和闭盖等的仿真，，仿真度达到 90%。



图 5 真空罐罐盖启闭过程仿真

- (3) 参数设置的真实感的仿真, 如测量参数设置所用的测试界面与实际测试软件完全一致, 仿真度 100%。



图 6 详细的测试参数设置的选择

- (4) 分析处理的真实感的仿真, 测试界面和实际使用软件和方法完全一样, 仿真度达到 100%。

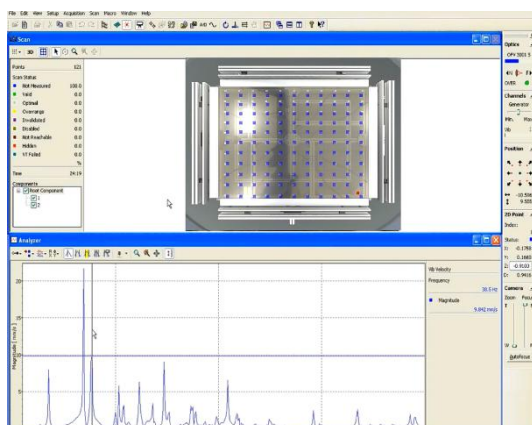


图 7 频率特性数据分析处理

(5) 结果显示的真实感的仿真，结果的计算和演示与实际测量系统完全一致，仿真度 100%。

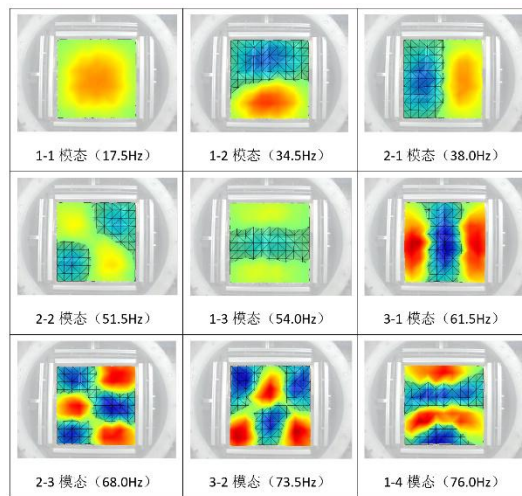


图 8 薄膜结构的固有频率和振动模态

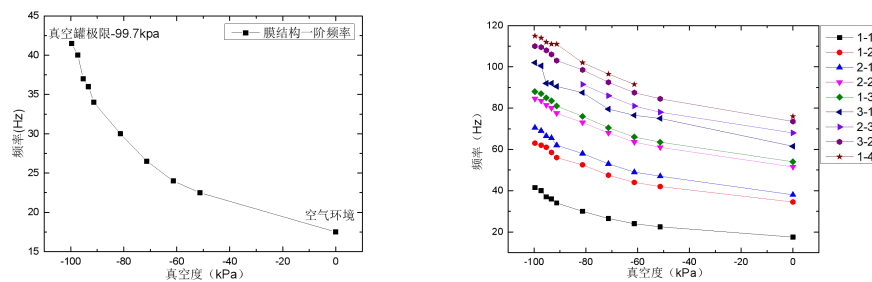


图 9 不同真空条件下薄膜结构的各阶固有频率的变化规律

### 知识点：共 12 个

- (1) 平面薄膜结构的振动原理
- (2) 气压对薄膜结构的影响
- (3) 薄膜结构的振动模态测试系统的搭建
- (4) 薄膜结构的固定方式
- (5) 薄膜结构的张力施加
- (6) 薄膜结构的真空条件调节
- (7) 薄膜结构的振动激励方法
- (8) 激光多普勒非接触测量原理
- (9) 振动模态测量原理
- (10) 模态拟合和和振型显示
- (11) 不同真空条件下薄膜结构的各阶固有频率和模态特性测量
- (12) 不同真空条件下薄膜结构的各阶固有频率变化规律分析

(13) 通过各阶固有频率测量确定薄膜的气压影响因子