

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2026.02.005

## 基于声音激励的涤纶纱线固有频率分析

张美玲<sup>1</sup>, 吴培铭<sup>1</sup>, 陶落雁<sup>1</sup>, 刘霖轩<sup>1</sup>, 叶健青<sup>2</sup>, 杨耀林<sup>3</sup>

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 浙江元龙复合材料有限公司, 浙江 金华 321000;  
3. 中国产业用纺织品行业协会, 北京 100020)

**摘要:** 为了研究纱线的固有频率, 采用光谱仪及声源等设备搭建纱线振动检测装置, 通过声音非接触式激励纱线振动, 分析3种具有不同杨氏模量的涤纶纱线在不同纱线长度和拉伸力条件下受到声音激励后的共振现象, 使用快速傅里叶变换法(FFT)得出纱线的固有频率。结果表明: 纱线长度、拉伸力和杨氏模量对纱线的固有频率存在显著影响; 纱线越长, 固有频率越小; 拉伸力越大, 固有频率越大; 纱线模量越大, 固有频率越大; 本文实验条件下, 杨氏模量为2.3 GPa的涤纶纱线长度为30 cm时在9.8 cN条件下固有频率最大, 为135 Hz。

**关键词:** 声音激励; 涤纶纱线; 共振; 固有频率; 杨氏模量

中图分类号: TS151

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2026)02-0031-08

### Analysis of natural frequency of polyester yarn under sound excitation

Zhang Meiling<sup>1</sup>, Wu Peiming<sup>1</sup>, Tao Luoyan<sup>1</sup>, Liu Linxuan<sup>1</sup>, Ye Jianqing<sup>2</sup>, Yang Yaolin<sup>3</sup>

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Zhejiang Yuanlong Composites Co., Ltd., Jinhua 321000, Zhejiang Province, China; 3. China Nonwovens and Industrial Textiles Association, Beijing 100020, China)

**Abstract:** In order to study the natural frequency of yarn, a vibration detection device for yarn was built using a spectrometer and sound sources. Through the non-contact acoustic excitation of yarn vibration, the resonance phenomena of polyester yarns with three different Young's moduli were analyzed under various yarn lengths and tensile forces when excited by sound. The fast Fourier transform (FFT) method was used to obtain the natural frequency of the yarns. The results show that there is a significant effect of yarn length, tensile force and Young's modulus on the natural frequency of the yarns. The longer the yarn is, the lower the natural frequency will be. The greater the tensile force of the yarn is, the higher the natural frequency will be. The greater the modulus of the yarn is, the higher the natural frequency will be. Under the experimental conditions in this paper, the natural frequency of the polyester yarn with a Young's modulus of 2.3 GPa reaches its maximum value of 135 Hz at a length of 30 cm and a tension of 9.8 cN.

**Key words:** sound excitation; polyester yarn; resonance; natural frequency; Young's modulus

物体的固有频率仅与其固有特性有关, 如质量、形状、材质等<sup>[1-2]</sup>。物体在周期性变化外力的激励下发生振动<sup>[3-4]</sup>, 当激励频率接近或等于物体的固有频率时, 物体的振幅急剧增大, 发生了共振<sup>[5-7]</sup>。

在纺织生产过程中, 纱线在一定速度和张力等因素的作用下<sup>[8-10]</sup>, 会引起振动, 通过测试纱线振动的固有频率, 可以调控纱线质量<sup>[11-12]</sup>。Zhang等<sup>[13]</sup>根据涤纶

长丝<sup>[14]</sup>在纺纱过程中的振动特点, 建立纱线张力、纺纱速率和固有频率的理论关系, 从而检测涤纶长丝质量的均匀性。李杨等<sup>[15]</sup>针对纺织品生产过程中的张力波动问题, 提出了一种基于横向振动频率的非接触式方法, 以弦振动理论推导纱线横向振动方程<sup>[16]</sup>, 获取纱线振动频率, 用于检测纱线生产过程中的张力波动。沈丹峰等<sup>[17]</sup>针对织造过程中经纱高频振动引起断经进而

收稿日期: 2025-02-03

基金项目: 技术创新引导专项资助项目(20YDTPJC01380)

通信作者: 张美玲(1976—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为纺织材料与纺织品设计。E-mail: zhangmeiling@tiangong.edu.cn

影响生产的情况,采用非线性振动分析方法研究了纱线的线速度、梭口纱线长度和纱线张力波动幅值对经纱振动频率的影响,通过降低经纱振动频率以提高生产质量。

纱线固有频率的研究不仅有利于控制生产过程中的质量<sup>[18]</sup>,还可以反映纱线的内在属性,推测纱线的其他物理性质,如杨氏模量等。Prezelj 等<sup>[19]</sup>提出了一种非接触式振动声学检测方法,该方法利用扫描麦克风在近场测试铝、钢和软质有机玻璃细长板的固有振动模式,以间接确定材料的杨氏模量和泊松比。杨氏模量反映了纱线抵抗弹性变形的能力,与捻度和线密度等结构参数相比<sup>[20-22]</sup>,杨氏模量作为纱线的固有属性,更能从本质上反映纱线的力学性能<sup>[23-24]</sup>,是衡量纱线弹性和拉伸性能的关键指标<sup>[25]</sup>。常见天然或合成纤维纱线的杨氏模量通常在 1~100 GPa 范围内<sup>[23-24,26]</sup>。杨氏模量较低的纱线相对更容易在低频范围内测出固有频率。

基于以上研究,本文提出了一种利用声音非接触式激励纱线振动以研究纱线固有频率的方法。采用杨氏模量较低(1.5~2.5 GPa)的涤纶纱线作为实验材料,以便在振动测试时能更好地保持力学性能稳定。通过增加声音频率,激励纱线振动,分析接收光强,以探究杨氏模量、纱线长度和拉伸力对纱线固有频率的影响,以期预测纱线属性和提高生产质量提供参考。

## 1 实验与方法

### 1.1 材料与仪器

材料包括:1# 纱线,14.8 tex 涤纶单纱,杨氏模量为 2.3 GPa,潍坊华峰纺织有限公司;2# 纱线,29.5 tex 涤纶单纱,杨氏模量为 1.8 GPa,奥博纺织制线有限公司;3# 纱线,59.1 tex 涤纶单纱,杨氏模量为 1.6 GPa,奥博纺织制线有限公司。

仪器包括:DH-2000 型光源箱、USB4000 型光谱仪,海洋光学亚洲公司;SRS-XB01 型扬声器,日本索尼公司;砝码(5/10/20 g),上海研衡仪器有限公司;支架,广州美销宝文化用品有限公司;滑轮,温州三文计量检测设备有限公司。

### 1.2 纱线固有频率测试

采用光谱仪及声源等设备搭建了纱线振动检测装置,测试纱线的固有频率,如图 1 所示。纱线的一端夹持固定,另一端系上砝码以光滑的滑轮作为支撑。纱线的拉伸力由已知质量的砝码提供,可近似为砝码自然下垂所产生的重力。纱线上方 1.5 cm 处(接近但不接触支架台)放置扬声器作为声源,以确保声音能有

效激励纱线。扬声器通过蓝牙与计算机连接,采用 Audio TesterV3.0 软件调节声音频率,频率从 1 Hz 开始逐步增加。入射光纤与接收光纤为直径相同的圆柱形光纤,其位置正相对,纱线与入射、接收光纤的方向垂直。入射光源通过入射光纤照射支架台中间的纱线,部分光线被纱线遮挡,未被遮挡的光线通过接收光纤传输到光谱仪,记录接收光强的变化。特定频率的声音会引起纱线的显著振动,从而使得光线接收强度发生显著变化。接收光强变化最大时,记录光强变化的图像。

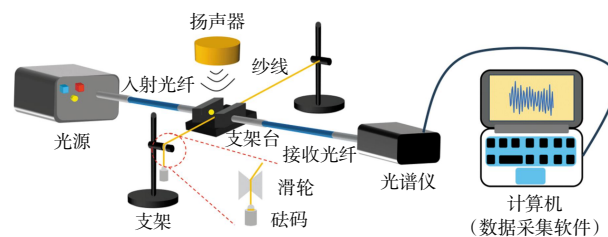


图 1 纱线振动的测试装置

Fig.1 Vibration detection device for yarn

为探究杨氏模量对纱线固有频率的影响,在拉伸力为 9.8 cN、纱线长度为 30 cm 条件下,测试 3 种涤纶纱线的固有频率;为了探究拉伸力对纱线固有频率的影响,在相同纱线长度下,通过改变砝码的质量,分析拉伸力分别为 4.9、9.8 和 19.6 cN(5、10、20 g 砝码)对纱线固有频率的影响;为探究纱线长度对纱线固有频率的影响,在相同拉伸力条件下,分析纱线长度分别为 30、35、40、45 和 50 cm 对其固有频率的影响。

### 1.3 数据处理方法

固有频率处的接收光强幅值与相邻频率处的接收光强幅值可能会相近,接收光强的数据和图像不能直接用于确定纱线的固有频率,因此还需要对数据进一步分析处理。本文采用快速傅里叶变换(FFT)法确定纱线的固有频率<sup>[27]</sup>。FFT 用于将离散数据从时域转变为频域,使得接收光强变化的频谱图像可以显现<sup>[28-29]</sup>。FFT 处理数据可以减小环境噪声、设备噪音及光源波动对数据的影响,在得出固有频率的基础上,还能够对数据进行降噪优化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纱线基准位置的确定

本文采用声音激励纱线以引起振动,利用光谱仪采集接收光强的变化,获取纱线的振动信息,测出纱线的固有频率。在测试准备阶段,纱线被放置的基准位置正确与否,直接关系到接收光强数据采集的有效

性。若纱线的基准位置设置不当,即使纱线达到共振状态,接收光强也不会发生预期变化,使得数据无法有效应用于纱线固有频率的准确评估。因此,根据对接收光强变化的影响,对纱线的基准位置进行分析。

光源通过入射光纤发射,截面近似圆形(直径约4 mm),如图2所示。通过判断接收光强的变化体现纱线的振动。纱线振动引起入射光线部分被遮挡,接收光纤接收的光线面积会发生变化。被纱线遮挡的梯形光线面积为 $S_B$ ,为简化计算,对于被遮挡面积 $S_B$ 通过等腰梯形的面积进行计算,其中纱线的横截面直径对应梯形的高:

$$S_B = \frac{1}{2} \times (d_i \pm l_i) \times h \quad (1)$$

式中: $S_B$ 为被遮挡面积( $\text{mm}^2$ ); $h$ 为纱线的横截面直径( $\text{mm}$ ); $d_i$ 和 $l_i$ 分别表示梯形的上底和下底( $\text{mm}$ ), $i = 0, 1, 2$ 。在纱线处,入射光线面积 $S_L$ ( $\text{mm}^2$ )是一个固定值。接收光线面积 $S_R$ ( $\text{mm}^2$ )决定了接收光强的大小,按照式(2)计算 $S_R$ :

$$S_R = S_L - S_B \quad (2)$$

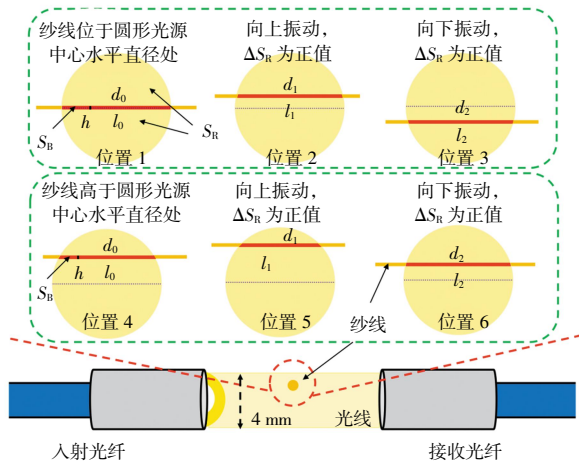


图2 纱线基准位置的示意

Fig.2 Schematic of reference position of yarn

(1) 若纱线的基准位置位于圆形光源中心的水平直径处,如图2所示的位置1。接收光线面积的变化由 $\Delta S_R$ 表示,按照式(3)进行计算:

$$\Delta S_R = \begin{cases} S_L - \frac{h}{2}(d_1 + l_1) - \left[ S_L - \frac{h}{2}(d_0 + l_0) \right] = \\ \frac{h}{2} \times [(d_0 + l_0)] - [(d_1 + l_1)] \\ S_L - \frac{h}{2}(d_2 + l_2) - \left[ S_L - \frac{h}{2}(d_0 + l_0) \right] = \\ \frac{h}{2} \times [(d_0 + l_0)] - [(d_2 + l_2)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta S_R$ 为接收光线面积的变化( $\text{mm}^2$ ); $d_0$ 和 $l_0$ 分别表示纱线在基准位置时的上底和下底( $\text{mm}$ ); $d_1$ 和 $l_1$

分别表示纱线向上振动时的上底和下底( $\text{mm}$ ); $d_2$ 和 $l_2$ 分别表示纱线向下振动时的上底和下底( $\text{mm}$ )。当纱线向上(位置2)或向下(位置3)振动时,都有 $d_1, l_1$ 和 $d_2, l_2$ 分别小于 $d_0, l_0$ , $S_R$ 均为正值,不能反映纱线的上下振动。

(2) 若纱线的基准位置高于圆形光源中心的水平直径处,如图2所示的位置4。当纱线向上振动时(位置5), $d_1, l_1$ 分别小于 $d_0, l_0$ , $S_R$ 为正值;当纱线向下振动时(位置6), $d_2$ 和 $l_2$ 分别大于 $d_0$ 和 $l_0$ , $S_R$ 为负值。 $S_R$ 正负值的变化,在光谱图像中表现为接收光强的上下变化,可以体现纱线的上下振动。

(3) 若纱线的基准位置低于圆形光源中心的水平直径处,也可以体现纱线的上下振动。本文采用图2所示位置4作为纱线基准位置进行测试。

## 2.2 固有频率计算

采用FFT处理实验数据,分析得出纱线固有频率。以拉伸力为9.8 cN、长度为50 cm的2#纱线为例,在49~54 Hz的声音频率范围内,纱线表现出明显的振动。这表明纱线的共振现象并不局限于单一频率处,而是在具有一定宽度的频率范围内,纱线容易发生共振。无声音条件下和在49~54 Hz声音激励下,纱线振动引起的光谱信号波形如图3所示。由图3可知,在没有声音激励的情况下接收光强维持在 $\pm 20$  Counts的区间内,主要为光源的波动和噪声信号成分,纱线未显著振动;当施加49~54 Hz声音激励纱线时,纱线在50、51和52 Hz的声音激励下显示出的接收光强均接近 $\pm 30$  Counts,而在其他频率声音激励下的接收光强明显低于这3个频率。

利用FFT将图3中的时域光谱图转换为频域图像,如图4所示。由图4可以明显看出,声音频率为51 Hz时,对应接收光强信号频率的幅值为8 103.2;声音频率为50和52 Hz时,对应的幅值分别为5 715.8和3 813.1,明显小于51 Hz;其他声音频率的幅值均小于51 Hz,表明51 Hz为纱线的固有频率。

由于光学设备及配套监测软件的数据更新速率有限,最大采样频率约为117.65 Hz(0.008 5 s进行1次数据采样),所以当采样频率小于实际信号频率的2倍时,会发生混叠现象<sup>[30-31]</sup>,导致频谱图中出现了不正确的频率成分,需要对频率进行纠正。采用混叠频率计算公式(4)可以找到正确的信号频率<sup>[32-33]</sup>:

$$f_a = |f - n \times f_s| \quad (4)$$

式中: $f_a$ 为混叠后的频率(Hz); $f$ 为实际信号频率(Hz); $n$ 为整数, $n = \text{Int}(\frac{f}{f_s} + 0.5)$ ,仅保留小数点以前的整数部分, $f_s$ 为采样频率(Hz)。

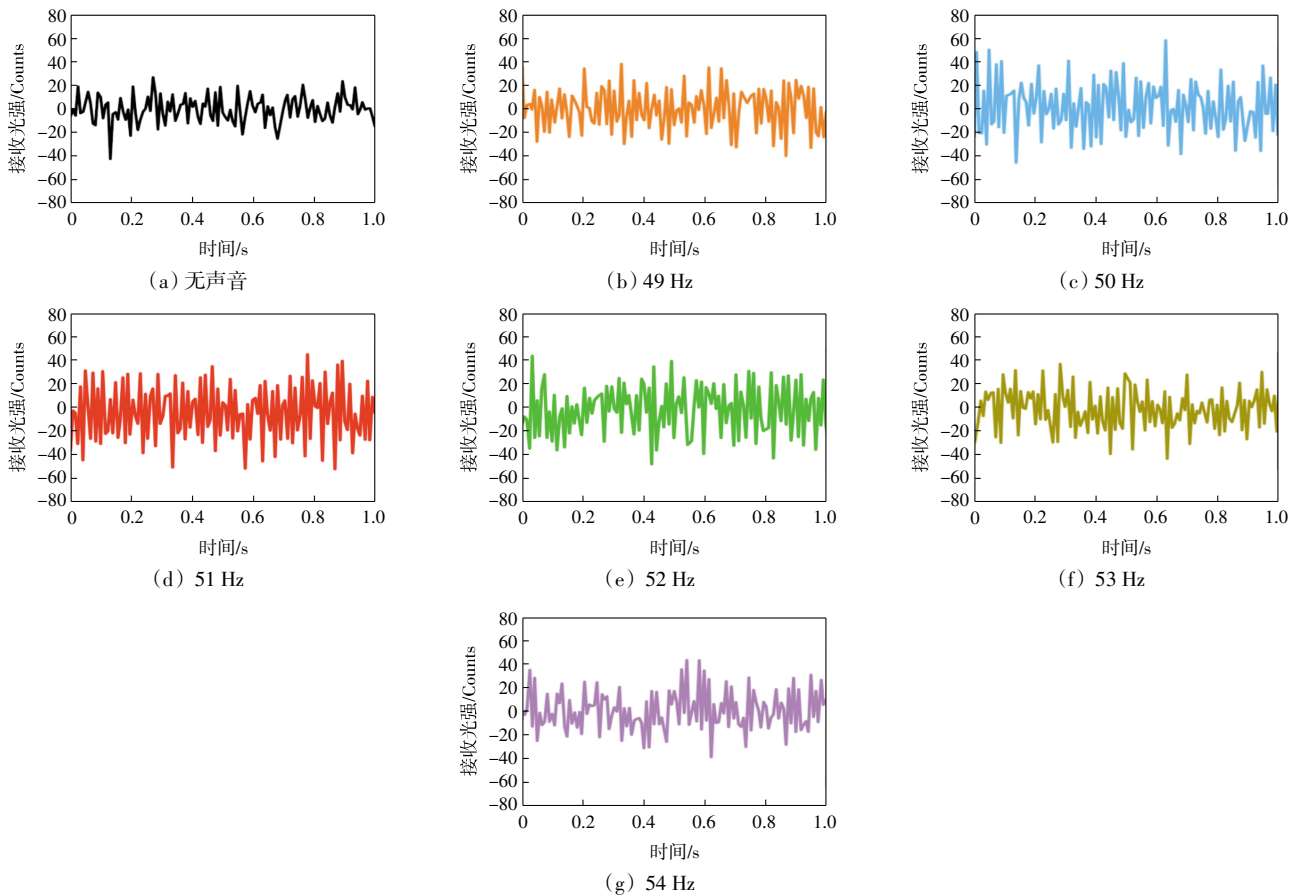


图 3 无声音和 49~54 Hz 声音激励下的光谱

Fig.3 Spectra under no sound and sound excitation from 49 to 54 Hz

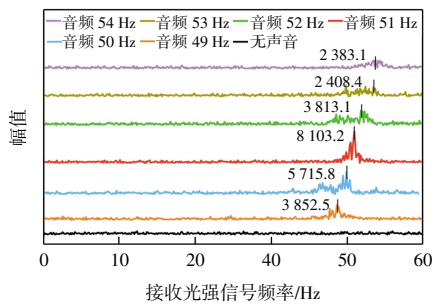


图 4 49~54 Hz 声音频率下接收光强信号的频域

Fig.4 Frequency domain of received light intensity signals at sound frequencies from 49 to 54 Hz

例如,测得 9.8 cN 拉伸力下、长度为 30 cm 的 2# 纱线受到 87 Hz 声音频率的激励时出现振动响应。此时采样频率约为 116.28 Hz(平均取样间隔为 0.008 6), 频域图如图 5 所示。由图 5 可知,接收光强信号频率在 28~32 Hz 范围内出现了峰,在数值上与声音频率不一致。实际信号频率  $f = 87 \text{ Hz}$ , 采样频率  $f_s = 116.28 \text{ Hz}$ ,  $n = 1$ , 由式(4)计算可得混叠后的频率  $f_a$  约为 29.28 Hz, 该频率在频域图的接收光强信号频率范围内(28~32 Hz), 说明了纱线振动后,光谱图未显示出的实际接收光强信号频率应该在 87 Hz 左右, 在数值上与声音

频率一致。表明纱线的振动频率与声音激励频率相同,纱线发生共振。

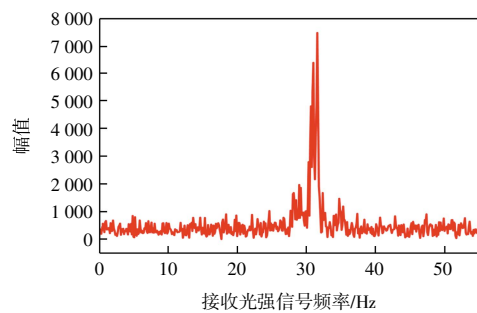


图 5 87 Hz 声音频率下发生混叠现象的频域

Fig.5 Frequency domain showing aliasing phenomenon at a sound frequency of 87 Hz

### 2.3 杨氏模量对固有频率的影响

为了探究纱线杨氏模量对其固有频率的影响,分别测试了拉伸力为 9.8 cN、纱线长度为 30 cm 时,3 种涤纶纱线的固有频率,结果如图 6 所示。由图 6 可知,1# 纱线(2.3 GPa)测出的固有频率最大,为 135 Hz,3# 纱线(1.6 GPa)测出的固有频率最小,为 63 Hz,说明杨氏模量较大的纱线具有较高的固有频率。这是因为杨

氏模量大,意味着材料的刚度强<sup>[34]</sup>。为了能够响应振动,需要更高的固有频率。

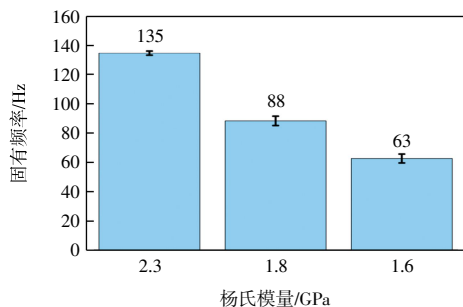


图 6 纱线杨氏模量对固有频率的影响

Fig.6 Influence of Young's modulus of yarn on natural frequency of yarns

### 2.4 纱线长度对固有频率的影响

为了探究纱线长度对固有频率的影响,3种涤纶纱线均取了5种纱线长度(30、35、40、45、50 cm),分别测试其在拉伸力为9.8 cN条件下的固有频率,结果如图7所示。

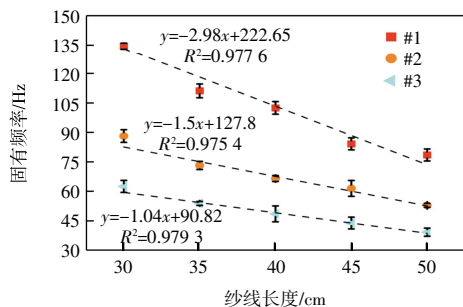


图 7 纱线长度对固有频率的影响

Fig.7 Influence of yarn length on natural frequency of yarns

由图7可知,随着纱线长度从30 cm增加到50 cm,3种纱线的固有频率均呈现出下降的趋势。对3种纱线的固有频率数据进行线性拟合,得出1#纱线的 $R^2$ 为0.9776,2#纱线 $R^2$ 为0.9754,3#纱线 $R^2$ 为0.9793,均大于0.95,表明拟合效果良好。纱线的固有频率和纱线长度存在明显的负相关性,表明纱线长度对纱线固有频率有显著影响。这是因为纱线的长度增加,其刚度会降低,振动时使纱线回复到原位的力减弱,需要更长时间完成一次振动,导致其固有频率下降<sup>[17]</sup>。

### 2.5 纱线拉伸力对固有频率的影响

在测试纱线的固有频率时,施加的拉伸力应避免过大或过小。过大的拉伸力会使纱线拉伸变形<sup>[35]</sup>,导致纱线的物理属性如线密度等发生显著改变;过小的拉伸力使纱线处于松弛状态,受到声音激励时振动现象不明显。因此,选择合适的拉伸力对于纱线固有频率的检测至关重要。

首先测试了3种涤纶纱线不同拉伸力下的固有频率,纱线在同一拉伸力条件下,纱线长度选取30、35、40、45和50 cm,测试情况如表1所示,其中“○”表示可以测出固有频率,“\”表示无法测出固有频率。

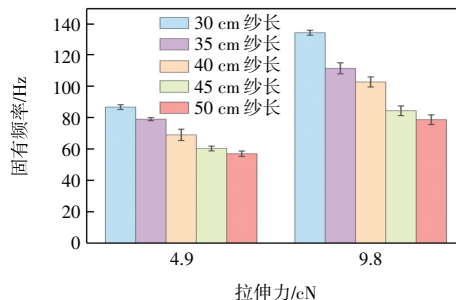
表 1 不同拉伸力下纱线的固有频率测试情况

Tab.1 Test result of yarn natural frequency under different tensile forces

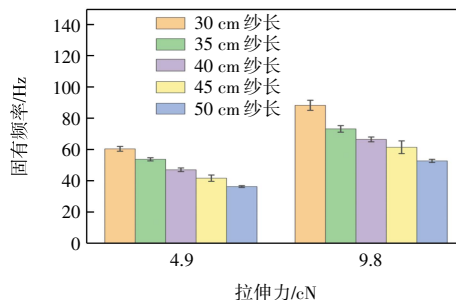
纱线种类	4.9 cN	9.8 cN	19.6 cN
1#	○	○	\
2#	○	○	\
3#	\	○	○

由表1可以看出,在3种拉伸力条件下,3种纱线均只能在其中2种条件下测出固有频率。由此表明4.9 cN相对不适合用于测试3#纱线的固有频率,19.6 cN相对不适合用于测试1#、2#纱线的固有频率。

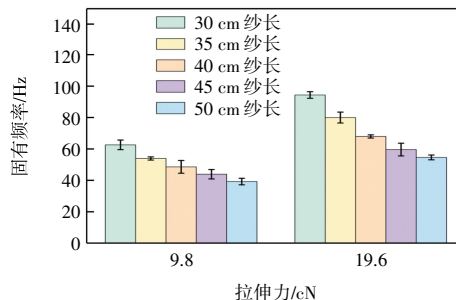
3种纱线分别在2种不同拉伸力条件进行测试,其固有频率如图8所示。



(a) 2种拉伸力下1#纱线的固有频率



(b) 2种拉伸力下2#纱线的固有频率



(c) 2种拉伸力下3#纱线的固有频率

图 8 拉伸力对纱线固有频率的影响

Fig.8 Influence of tensile force on natural frequency of yarns

由图 8 可知,4.9 cN 拉伸力条件下,1# 纱线和 2# 纱线分别在 5 种长度下测出的固有频率均低于在 9.8 cN 拉伸力下的固有频率;19.6 cN 拉伸力条件下,3# 纱线在 5 种长度下测出的固有频率均高于在 9.8 cN 拉伸力下的固有频率。由此表明,拉伸力对纱线的固有频率具有影响,在实验选取的 3 个拉伸力条件下,拉伸力越大,纱线的固有频率越高。这是因为拉伸力增大会使纱线处于更张紧的状态,其内部张力增大,刚度增强,振动时使纱线恢复到原位的力增大,振动速度加快,固有频率增高<sup>[15,36]</sup>。因此,拉伸力作为影响固有频率的一个重要因素<sup>[37]</sup>,可以在纱线的种类和长度受限的情况下,通过改变拉伸力来测试固有频率。

### 3 结 论

本文基于声音激励,引起纱线共振,采用自制纱线振动检测装置,通过改变声音频率将纱线的振动转换为接收光强变化,测出纱线的固有频率,并进一步探究了杨氏模量、纱线长度和拉伸力对固有频率的影响。结果表明:

(1) 纱线的基准位置被确定为高于圆形光源中心的水平直径处。当纱线上下振动时,在光谱图像中表现为接收光强的上下变化,确定该基准位置可以实现光谱仪对纱线振动信息的有效采集。

(2) 采用纱线振动检测装置进行测试,并通过 FFT 法处理实验数据,成功测出纱线固有频率,证明了本文方法的可行性。当频谱图中出现不正确的频率成分时,采用混叠频率计算公式对频率进行纠正,纠正后的接收光强信号频率与声音激励频率相同,证实纠正方法有效。

(3) 在相同的拉伸力和纱线长度下,纱线的固有频率受到杨氏模量的影响,杨氏模量越大,纱线的固有频率越大。

(4) 在拉伸力相同的条件下,纱线长度增加,纱线的固有频率降低,表现出明显的负相关关系。

(5) 施加过大或过小的拉伸力不利于测出部分纱线的固有频率。在纱线长度相同的条件下,较大的拉伸力产生较高的固有频率。

(6) 本文实验条件下,杨氏模量为 2.3 GPa 的涤纶纱线长度为 30 cm 时,在 9.8 cN 条件下固有频率最大,为 135 Hz。

#### 参考文献:

[1] 高岩,李嘉禄.层合结构复合材料振动特性研究进展[J].天

津工业大学学报,2009,28(3):19-24.

Gao Yan, Li Jialu. Research progress on vibration characteristics of laminated composites[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2009, 28(3): 19-24(in Chinese).

[2] 张枫茁,顾吉林,李欣阳,等.固有频率与共振频率影响因素及实验研究[J].大学物理实验,2019,32(2):37-41.

Zhang Fengzhuo, Gu Jilin, Li Xinyang, et al. Study on affecting factors and experiment between natural frequency and resonance frequency[J]. Physical Experiment of College, 2019, 32(2): 37-41(in Chinese).

[3] Blaga M, Seghedini N E, Grosu C. Measuring the natural frequencies of knitted materials for protection against vibration[J]. Industria Textila, 2022, 73(1): 89-95.

[4] Rahemtulla Z, Hughes-Riley T, Dias T. Vibration-sensing electronic yarns for the monitoring of hand transmitted vibrations[J]. Sensors, 2021, 21(8): 2780.

[5] 宋玉霞.关于共振现象的解释[J].商情(科学教育家),2008(4):362.

Song Yuxia. Explanation of resonance phenomenon[J]. Business Situation (Science Educator Edition), 2008(4): 362(in Chinese).

[6] 常英珂,吴瑞德,李琳,等.爆炸螺栓固有频率的影响因素分析[J].火工品,2020(4):12-15.

Chang Yingke, Wu Ruide, Li Lin, et al. Analysis of factors influencing on natural frequency of explosive bolt[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(4): 12-15(in Chinese).

[7] 孔令滨,张火明,陈阳波,等.深海立管固有频率影响因素分析[J].舰船科学技术,2018,40(1):70-74,113.

Kong Lingbin, Zhang Huoming, Chen Yangbo, et al. The analysis of influence factors on natural frequency of deep-sea risers[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(1): 70-74, 113(in Chinese).

[8] 李京,范真,陈祖英,等.细纱机锭子有限元分析及减振方法研究[J].现代纺织技术,2015,23(6):9-12.

Li Jing, Fan Zhen, Chen Zuying, et al. Study on finite element analysis on spinning frame spindle and vibration reduction method[J]. Advanced Textile Technology, 2015, 23(6): 9-12(in Chinese).

[9] Peng L H, Li Y, Zheng Q Y, et al. Measurement of axial motion yarn tension based on transverse vibration frequency[J]. Textile Research Journal, 2023, 93(5/6): 1019-1029.

[10] 王延年,李鹏程,廉继红,等.纱线卷绕系统恒张力先进控制策略[J].纺织高校基础科学学报,2023,36(1):49-56.

Wang Yannian, Li Pengcheng, Lian Jihong, et al. Research on advanced control strategy of constant tension in yarn winding system[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2023, 36(1): 49-56(in Chinese).

[11] 周国庆,杨会会,袁汝旺,等.考虑结合面特性的锭子组合系统固有频率与振型[J].天津工业大学学报,2018,37(5):

- 70-77.
- Zhou Guoqing, Yang Huihui, Yuan Ruwang, et al. Natural frequencies and vibration modes of spindle combination system considering joint surface characteristics[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2018, 37(5): 70-77(in Chinese).
- [12] 侯全英, 张纳. 振动实验软件设计与应用研究[J]. 天津工业大学学报, 2001, 20(3): 82-83.
- Hou Quanying, Zhang Na. Study on design and application of vibration experiment softwares[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2001, 20(3): 82-83(in Chinese).
- [13] Zhang D J, Ma Q H, Dong H L, et al. Time-delayed feedback bistable stochastic resonance system and its application in the estimation of the polyester filament yarn tension in the spinning process[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2023, 168: 113133.
- [14] Zhang D J, Ma Q H, Tan Y, et al. Non-contact detection of polyester filament yarn tension in the spinning process by the laser Doppler vibrometer method[J]. Textile Research Journal, 2022, 92(5/6): 919-928.
- [15] 李杨, 彭来湖, 刘建廷, 等. 基于横向振动频率的轴向运动纱线张力测量[J]. 纺织学报, 2023, 44(6): 72-77.
- Li Yang, Peng Laihu, Liu Jianting, et al. Measurement of yarn tension in axial direction based on transverse vibration frequency[J]. Journal of Textile Research, 2023, 44(6): 72-77 (in Chinese).
- [16] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 3版. 南京: 南京大学出版社, 2012.
- Du Gonghuan, Zhu Zhemin, Gong Xiufen. Acoustics Foundation[M]. 3rd ed. Nanjing: Nanjing University Press, 2012 (in Chinese).
- [17] 沈丹峰, 叶国铭. 织造过程中经纱振动特性的分析[J]. 纺织学报, 2007, 28(5): 41-46.
- Shen Danfeng, Ye Guoming. Analyzing the vibrating characteristics of warp yarns during weaving[J]. Journal of Textile Research, 2007, 28(5): 41-46(in Chinese).
- [18] Shu Y P, Tang Y. Analysis and testing of the natural frequencies of the ring-spinning balloon[J]. Textile Research Journal, 2023, 93(3/4): 866-877.
- [19] Prezelj J, Nikonov A, Emri I. Using sound in the very near field of vibrating plates for determination of their mechanical properties[J]. Applied Acoustics, 2022, 186: 108486.
- [20] 张美忠, 姚穆. 纯涤纶股线拉伸力学性能与捻度的关系[J]. 棉纺织技术, 2004, 32(2): 9-11.
- Zhang Meizhong, Yao Mu. Relation between tensile mechanics property and twist of pure polyester compound yarn[J]. Cotton Textile Technology, 2004, 32(2): 9-11(in Chinese).
- [21] 张美忠, 姚穆, 张一心. 涤/棉混纺股线拉伸力学性能与捻度关系的研究[J]. 西北纺织工学院学报, 2001, 15(2): 154-160.
- Zhang Meizhong, Yao Mu, Zhang Yixin. The relations between tensile mechanic performance and twist on polyester and cotton plied yarns[J]. Journal of Northwest Institute of Textile Science and Technology, 2001, 15(2): 154-160(in Chinese).
- [22] 霍福磊, 张国利, 马明, 等. 涤纶纱与棉纱模量-应变曲线的分析[J]. 天津工业大学学报, 2012, 31(2): 37-39.
- Huo Fulei, Zhang Guoli, Ma Ming, et al. Analysis of modulus-strain curves of polyester yarn and cotton yarn[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2012, 31(2): 37-39(in Chinese).
- [23] Abida M, Baklouti A, Gehring F, et al. Inverse approach for flax yarns mechanical properties identification from statistical mechanical characterization of the fabric[J]. Mechanics of Materials, 2020, 151: 103638.
- [24] Araki J, Miyayama M. Wet spinning of cellulose nanowhiskers; fiber yarns obtained only from colloidal cellulose crystals[J]. Polymer, 2020, 188: 122116.
- [25] Ma H, Li Y, Wang D. Investigations of fiber twist on the mechanical properties of sisal fiber yarns and their composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, 33(7): 687-696.
- [26] Tezuka T, Mori N, Murayama T, et al. Nanostructural characterization of carbon nanotube yarn high-strengthened by joule heating[J]. Carbon, 2021, 171: 437-443.
- [27] 张晓彦, 刘京明. 傅里叶变换法在电梯结构振动测试的应用[J]. 机械设计与制造, 2024(9): 58-63, 69.
- Zhang Xiaoyan, Liu Jingming. Application of Fourier transform method in vibration test of elevator structure[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(9): 58-63, 69(in Chinese).
- [28] 王盼. 傅里叶变换运算在电化学阻抗谱测量方法中的应用[J]. 电源技术, 2023, 47(9): 1126-1129.
- Wang Pan. Application of Fourier transform operation in electrochemical impedance spectroscopy measurement method[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(9): 1126-1129 (in Chinese).
- [29] 邓文, 邓中民. 基于快速傅里叶变换与织物纹理能量算法的起毛起球织物纹理滤除[J]. 现代纺织技术, 2012, 20(2): 21-24, 29.
- Deng Wen, Deng Zhongmin. Pilling fabric texture filter based on fast Fourier transform and fabric texture energy algorithm[J]. Advanced Textile Technology, 2012, 20(2): 21-24, 29(in Chinese).
- [30] 韩建棒, 申彦利, 刘焕举. 跨座式单轨车轨耦合系统振动信号采集频率分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14364-14370.
- Han Jianbang, Shen Yanli, Liu Huanju. Vibration signal acquisition frequency analysis of straddle monorail vehicle-track beam coupling system[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(33): 14364-14370(in Chinese).
- [31] 张颖, 余晨. 一种改进的小波变换抗混叠电力系统谐波检

- 测方法[J]. 电器与能效管理技术, 2019(10): 64-68.
- Zhang Ying, Yu Chen. An improved wavelet transform anti-aliasing method for power system harmonic detection[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(10): 64-68 (in Chinese).
- [32] 应怀樵, 沈松, 刘进明. 频率混叠在时域和频域现象中的研究[J]. 振动.测试与诊断, 2006, 26(1): 1-4.
- Ying Huaiqiao, Shen Song, Liu Jinming. Study on frequency aliasing in time and frequency domains[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2006, 26(1): 1-4(in Chinese).
- [33] 罗大勇, 唐杰. 一种解决频率混叠的工程化方法[J]. 中国科技信息, 2023(3): 76-78.
- Luo Dayong, Tang Jie. An engineering method to solve frequency aliasing[J]. China Science and Technology Information, 2023(3): 76-78(in Chinese).
- [34] 张珂, 安爱博, 张丽秀, 等. 陶瓷电主轴固有频率影响因素灵敏度分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 529-535.
- Zhang Ke, An Aibo, Zhang Lixiu, et al. Sensitivity analysis of factors affecting the natural frequencies of ceramic motorized spindle[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2020, 36(3): 529-535(in Chinese).
- [35] 缪宇轩, 孟祥益, 夏港东, 等. 非接触式纱线张力监测系统的研制与开发[J]. 毛纺科技, 2020, 48(5): 71-76.
- Miao Yuxuan, Meng Xiangyi, Xia Gangdong, et al. Research and development of non-contact yarn tension monitoring system[J]. Wool Textile Journal, 2020, 48(5): 71-76(in Chinese).
- [36] Crocker M J, Arenas J P. Fundamentals of the direct measurement of sound intensity and practical applications[J]. Acoustical Physics, 2003, 49(2): 163-175.
- [37] Emadi M, Payvandy P, Ali Tavaniaie M, et al. Measurement of vibration in polyester filament yarns to detect their apparent properties[J]. The Journal of the Textile Institute, 2022, 113(7): 1270-1280.

#### 本文引文格式:

张美玲, 吴培铭, 陶落雁, 等. 基于声音激励的涤纶纱线固有频率分析[J]. 天津工业大学学报, 2026, 45(2): 31-38.

Zhang Meiling, Wu Peiming, Tao Luoyan, et al. Analysis of natural frequency of polyester yarn under sound excitation[J]. Journal of Tiangong University, 2026, 45(2): 31-38(in Chinese).

(责任编辑:孙广宇)

(上接第 30 页)

- [25] Subtil E L, Almeria Raggio R, Lemos H G, et al. Direct membrane filtration (DMF) of municipal wastewater by mixed matrix membranes (MMMs) filled with graphene oxide (GO): Towards a circular sanitation model[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 441: 136004.
- [26] Ha H, Park J, Ando S, et al. Gas permeation and selectivity of poly(dimethylsiloxane)/graphene oxide composite elastomer membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2016, 518: 131-140.
- [27] Cocchi G, De Angelis M G, Doghieri F. Solubility and diffusivity of liquids for food and pharmaceutical applications in crosslinked polydimethylsiloxane (PDMS) films: II. Experimental data on mixtures[J]. Journal of Membrane Science, 2015, 492: 612-619.

#### 本文引文格式:

孟建强, 余波, 王超, 等. PAN/PDMS-GO 混合基质膜用于大豆油生产中丙酮的回收[J]. 天津工业大学学报, 2026, 45(2): 24-30, 38.

Meng Jianqiang, Yu Bo, Wang Chao, et al. PAN/PDMS-GO mixed-matrix membrane used for acetone recovery in soybean oil production[J]. Journal of Tiangong University, 2026, 45(2): 24-30, 38(in Chinese).

(责任编辑:孙广宇)