

悬臂梁式纬纱张力传感器结构优化

李耀杰¹, 沈丹峰^{1,*}, 常革联², 王 玉¹, 李靖宇¹

(1.西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048;

2.经纬津田驹纺织机械(咸阳)有限公司, 陕西 咸阳 712000)

摘要:使用拓扑优化算法对悬臂梁结构进行优化分析,通过瞬态动力学和谐响应分析验证悬臂梁稳定性的提升和滞后时间的大小。在瞬态动力学中对优化前后的悬臂梁在10 Hz和100 Hz频率下进行仿真计算分析,计算出悬臂梁自由端Z向的位移响应曲线;在谐响应分析中计算0~500 Hz范围内滞后相位角与频率、幅值与频率的变化关系曲线。结果表明,在瞬态动力学分析中,优化后的悬臂梁响应曲线与参考曲线最为接近,根据谐响应曲线可以计算出不同频率下悬臂梁的滞后时间。

关键词:纱线张力;悬臂梁;固有频率;模态拓扑优化;谐响应

中图分类号:TP212.1

文献标识码:A

文章编号:1673-0356(2021)02-0033-05

在纺织生产过程中,纬纱张力的大小对织造质量有较大影响,纱线张力过大,增加断头;纱线张力过小,会出现纬缩影响布匹的平滑度^[1]。实时准确检测纬纱张力一直未能得到很好解决,特别是喷气织机的快速发展,入纬率不断提高,由纬纱张力不当引起的纬缩或断纬等疵点影响织物质量的现象表现得越发突出。因此,对纬纱张力实时准确检测显得十分重要。

接触式检测方法中较为常见的是基于悬臂梁的传感器检测,通过悬臂梁的应变转换成电信号或光信号进而计算出纬纱的张力,但是在纬纱高频快速响应下,应力波在悬臂梁上的传递过程非常复杂,总是存在响应滞后的现象。国外曾利用计算机和传感器技术通过接触式测量纱线张力^[2-4],但在测量过程中影响了纱线加捻,不能真实地反映纱线张力。Carvalho Vitor等^[5]研究了一种用于测定纱线质量特性的自动系统,该系统能够直接检测直径1 mm范围内的纱线张力,但是采样频率较低,无法满足高速织机的要求。韦永奇等^[6]设计了基于单片机的喷气织机纬纱张力测试系统,因为采样频率较低,无法满足高速织机的要求。秦绍辉等^[7]设计了基于LabVIEW的喷气织机综合性能测试系统,能够满足高速织机的采样要求,测量出张力的变化趋势,但没有对响应滞后进行分析。Amer

Karnoub等^[8]提出了一种适合织机纱线张力计算的仿真模型,但由于导纱轮易磨损,该模型在实际应用中的稳定性较差。庾在海等^[9]使用CCD图像传感器对纱线直径的变化量进行了测量,通过弹性力学的公式计算出纱线的张力,但是纱线并不是规则的圆柱体,纱线各处直径大小并不均匀,因此计算出来的结果和实际值会有差异。张楠等^[10]使用CCD图像传感器对纱线形态进行采集,经图像处理得到纱线的波动频率,从而计算出相对应的张力值,但对于运动过程中不发生波动的纱线并不适用。缪宇轩等^[11]通过吹气管对2个支撑点之间的纱线进行喷气,激发纱线的振动,但是在纬纱引纬过程中,纬纱一端处于自由引纬,难以建立2个支撑点,此时纱线的振动频率不适用该方法。任泉等^[12-13]使用光纤Bragg光栅应变传感器对纱线张力测量,具有很高的灵敏度和精度,但是只适用于静态测量,没有解决悬臂梁响应滞后的问题。郝永健等^[14]通过对弹簧片进行裁剪、挖孔等操作,提高了弹簧片的固有频率和稳定性,同样也没有分析响应滞后的问题。吴震宇等^[15]建立的动力学模型能够有效消除张力检测误差,并验证了悬臂梁响应存在滞后性,但没有分析振动频率与滞后时间的关系。

本文对接触式悬臂梁结构进行拓扑优化来提高悬臂梁的固有频率,增加响应过程的稳定性,并对优化前后悬臂梁固有频率进行比较。悬臂梁进行谐响应分析,计算出悬臂梁在不同频率下的滞后相位角,并根据主轴的转速计算出滞后的时间。

收稿日期:2020-09-28

基金项目:陕西省科技厅重点研发计划(2018TSCXL-GY-03-02)

作者简介:李耀杰(1995-),男,硕士研究生在读,研究方向为纬纱张力和纬纱信号检测。

*通信作者:沈丹峰(1969-),男,副教授,主要从事现代设计方法与机器人机电一体化研究,E-mail:dfshen@xpu.edu.cn。

1 悬臂梁结构分析

以变截面等强度悬臂梁为基础进行研究。图1是纬纱张力传感器的悬臂梁结构示意图。 l 为悬臂梁的长度, a 为悬臂梁固定端宽度, b 为悬臂梁自由端宽度, d 为悬臂梁厚度。

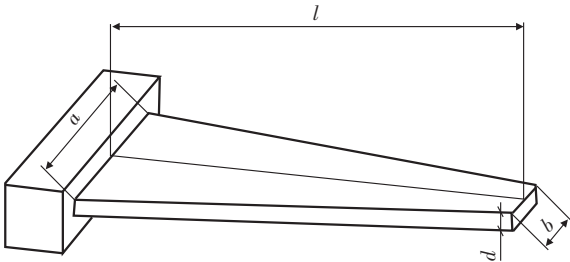


图1 悬臂梁结构

对于变截面悬臂梁的自由弯曲振动控制方程可以表示为式(1)^[16]：

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho_c \left[ad + \frac{d(b-a)x}{l} \right] \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \quad (1)$$

式中： E 为弹性模量； J 为惯性矩； ρ_c 为悬臂梁的密度。

悬臂梁的边界条件为 $y(0) = 0, \dot{y}(0) = 0, \ddot{y}(l) = 0, \dot{y}(l) = 0$ ，求解方程式(1)可得变截面悬臂梁的一阶弯曲谐振频率为：

$$f = \frac{Bd}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho_c}} \quad (2)$$

其中

$B =$

$$B = \frac{[(119a^2 + 952ab + 1785b^2 - 7\sqrt{249a^4 + 3984a^3b + 24606a^2b^2 + 66480ab^3 + 64425b^4})]^{1/2}}{[2a^2 + 24ab + 30b^2]^{1/2}} \quad (3)$$

从式(3)中可以看出， B 的数值大小与悬臂梁固定端宽度 a 和自由端宽度 b 有关，因此 B 是一个关于 a 、 b 的函数。通过图2参数 B 与 b/a 的变化曲线可以得到结论：当 $b=0$ 时， B 函数取得最大值，并随着悬臂梁自由端宽度与固定端宽度的比值 b/a 上升而下降。

当等强度梯形悬臂梁自由端宽度 $b=0$ 时，由式(2)可知悬臂梁的一阶固有频率公式为：

$$f \approx 0.3289 \frac{d}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho_c}} \quad (4)$$

当等强度梯形悬臂梁自由端宽度 b 等于固定端宽度 a 时，由式(2)可知悬臂梁的一阶固有频率公式为：

$$f \approx 0.1623 \frac{d}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho_c}} \quad (5)$$

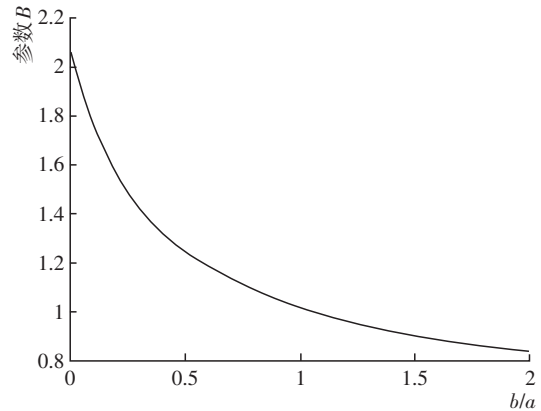


图2 参数 B 与 b/a 的关系

结合纬纱张力传感器在织机的安装位置，为了获得较大的固有频率，将等强度梯形悬臂梁设计成厚度为2 mm，固定端宽度为50 mm，自由端宽度为5 mm，长度为100 mm的等腰梯形悬臂梁，同时考虑到纬纱与悬臂梁必须有一定的接触面积，因此将自由端向外延伸为宽4.6 mm，长6.6 mm的等厚度体积。悬臂梁材料选用1Cr15(不锈钢)，弹性模量为200 GPa，泊松比为0.3，密度为7.9 kg/m³。

2 悬臂梁的模态拓扑优化

2.1 模态拓扑优化

根据单自由度弹簧阻尼系统计算无阻尼固有频率公式 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ 可知，模态分析模型的固有频率与刚度 k 正相关，与质量 m 负相关。当体积模型发生变化时，不仅存在质量的变化，还存在刚度的变化。这就导致以固有频率为优化的目标函数时，软件必须多次循环优化，以获得最优解，其结果对于动力学条件下的模型设计有非常重要的意义^[17]，具体优化流程如图3所示。

在优化过程中，首先根据实际情况对模型施加约束条件。另外，拓扑优化只支持二维模型的Plane2和Plane82单元、三维模型的solid92和solid95单元，进行拓扑优化时要选择正确的单元类型。在优化过程中，为了降低计算量和缩短计算时间，要明确优化区域和非优化区域，然后设置迭代次数进行计算，最后查看计算结果和迭代次数是否收敛，从而确定优化过程是否完成。将悬臂梁分成3个区域，分别为固定端区域、纬纱与悬臂梁接触区域、优化区域(中间等腰梯形区

域)。单元类型选择 solid95 单元,固定端施加固定约束,将第一阶固有频率作为优化目标,优化约束为减少体积 10%,收敛公差设定为 0.000 3,迭代次数为 90 次。得到迭代曲线如图 4 所示,拓扑优化结果如图 5 所示。

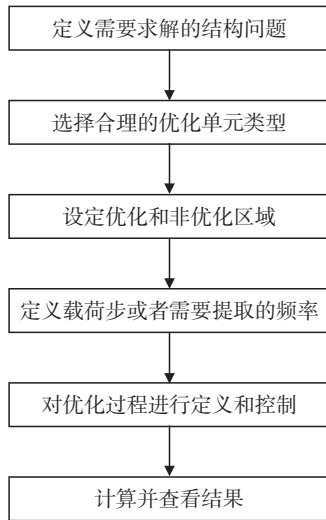


图 3 优化流程

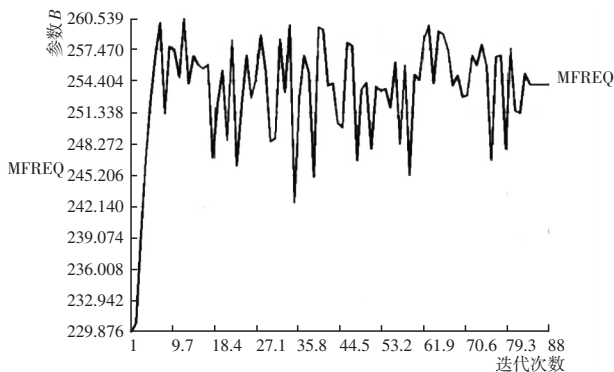


图 4 拓扑优化迭代过程

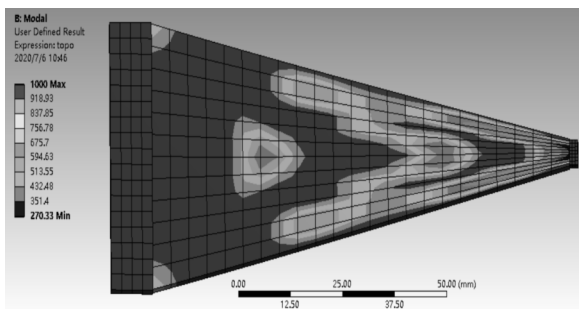


图 5 优化后悬臂梁

2.2 拓扑优化结果分析

从图 4 的迭代曲线可以发现,曲线开始时变化比较剧烈,这是因为悬臂梁厚度小,任一位置的材料减少对悬臂梁固有频率都有一定的影响,迭代到 83 步时悬

臂梁的固有频率的变化趋于稳定,迭代到 88 步时固有频率的变化值小于收敛公差,终止迭代。图 5 为悬臂梁优化后的变化云图,其中,深色为保留材料,灰色为去除材料,其他颜色则根据深浅来表明去除材料的多少。

由于悬臂梁的厚度较小,同时也为了降低悬臂梁的加工难度,忽略颜色较浅的部分,直接采用挖空的形式来去除材料,结果如图 6 所示。可以看出,主要去除的材料集中在自由端和中间部分,其中材料实际裁剪的位置和拓扑优化的位置存在差异,所以两者最终的一阶固有频率计算值并不相同,但相差不大。

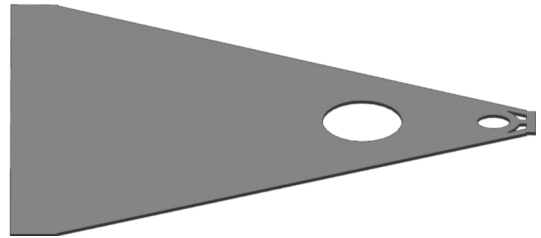


图 6 裁剪后模型

将悬臂梁优化前和优化后的前 6 阶模态进行对比后发现,一阶固有频率提升最为明显,其他阶数固有频率也有一定的提升,具体变化如表 1 所示。

表 1 优化前后悬臂梁模态

模态阶数	优化前频率/Hz	优化后频率/Hz	提高百分比/%
1	234.46	252.35	7.63
2	1 005.90	1 019.90	1.39
3	1 719.50	1 749.90	1.77
4	2 502.10	2 547.50	1.81
5	4 032.90	4 096.40	1.58
6	4 475.30	4 539.60	1.43

未优化悬臂梁的一阶固有频率为 234.46 Hz,体积为 6 526.4 mm³。优化后悬臂梁的一阶固有频率为 252.35 Hz,体积为 6 240.1 mm³。固有频率提高了 7.63%,增加了稳定性,体积降低了 4.38%,减少了材料的使用。

3 悬臂梁滞后响应分析

在实际测量中,悬臂梁振动时应变的变化范围为 0~919.9 με,阻尼比变化范围为 0.001 4~0.002 7^[18]。悬臂梁阻尼比的大小会随着应变值变化而变化,为了能够使用 ANSYS 软件分析出悬臂梁振动过程中的滞后时间,选取悬臂梁阻尼比的中间值 0.002 作为悬臂梁的固有阻尼比。在 ansys 设置中有全局质量阻尼 α

系数和全局刚度阻尼系数 β , 全局质量阻尼系数多用于黏性材料或流体分析时设置, 对于金属材料一般只需要考虑全局刚度阻尼系数 β 。当仅需要考虑全局刚度阻尼系数 β 时, 频率 f 、阻尼比 ξ 、全局刚度阻尼系数 β 存在函数关系式(6)^[17]:

$$\beta = \frac{\xi}{\pi f} \tag{6}$$

其中: 阻尼比 $\xi = 0.002$ 。

喷气织机的车速在 600~1 200 r/min, 纬纱从开始引纬到稳定引纬的过程中频率变化范围为 0~20 Hz, 纬纱的实际振动频率与很多因素有关。朱文静等^[19-20]对纬纱密度与纬纱飞行状态的关系进行了研究, 得出随着纬纱线密度值的减小, 纬纱越细, 纬纱的飞行状态越稳定, 即纬纱的实际振动频率与织机主轴的转动频率越接近。并对含棉量为 28%、18%、14%、10%的纱线进行比较, 含棉量为 10%的纱线运动状态最为稳定。以车速 600 r/min, 纱线含棉量 10%为例, 纬纱稳定引纬为 10 Hz, 取 $f = 10$ Hz 代入刚度阻尼系数计算公式得 $\beta = 6.37 \times 10^{-5}$ 。在瞬态动力学分析中, 将悬臂梁固定端施加固定约束, 自由端施加幅值为 1 N, 频率为 10 Hz, 竖直方向变化的正弦载荷, 通过对未优化和优化后的悬臂梁进行以上操作后得到两者自由端 Z 向随时间变化的位移曲线, 如图 7 所示。可以看出优化后悬臂梁在 0.05 s 后曲线变化开始稳定, 未优化悬臂梁在 0.15 s 后曲线变化开始稳定。

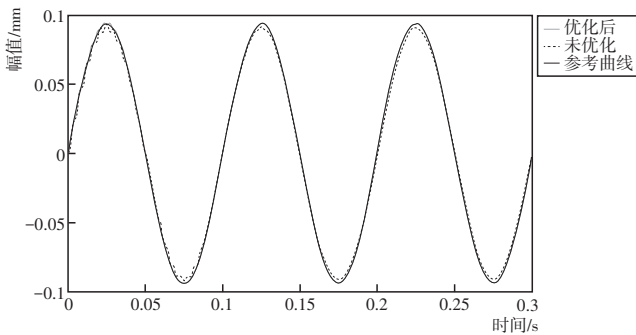


图 7 10 Hz 优化前后对比

同理, 将施加的正弦载荷频率改为 100 Hz 后, 得到自由端 Z 向随时间变化的曲线, 如图 8 所示。可以看出优化后悬臂梁在 0.01 s 后曲线变化开始稳定, 未优化悬臂梁在 0.016 s 后曲线变化开始稳定。可见优化后的悬臂梁比未优化的悬臂梁达到稳定需要的时间短。

为了能够了解到悬臂梁在稳态响应下不同频率的

响应幅值与滞后相位角, 接下来对悬臂梁进行了谐响应分析, 将悬臂梁固定端施加固定约束, 由于纬纱的飞行过程张力较小, 自由端施加幅值为 1 N 大小的力, 计算 0~500 Hz 范围内的谐响应分析, 最终得到的谐响应分析结果的幅值变化和滞后相位变化如图 9、图 10 所示。

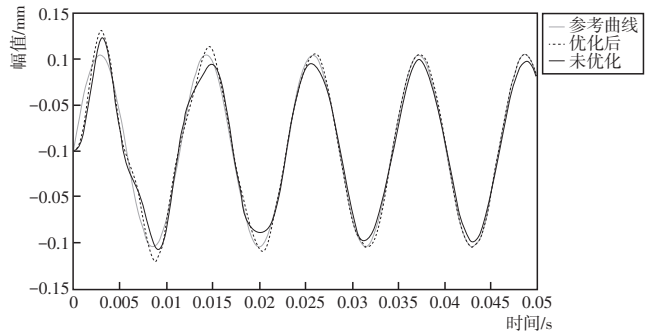


图 8 100 Hz 优化前后对比

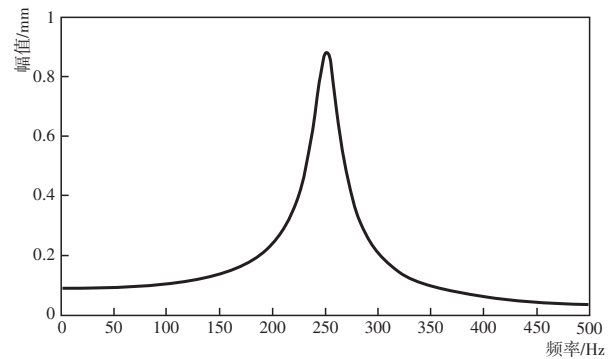


图 9 幅值变化曲线

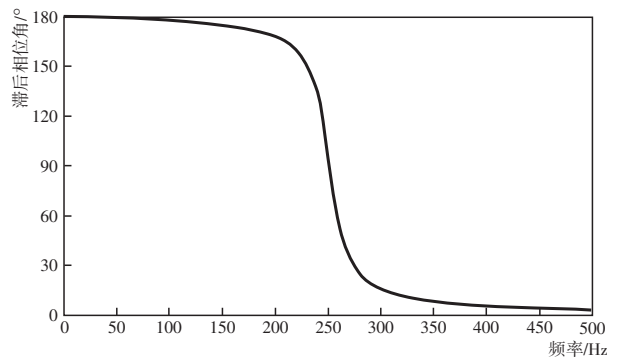


图 10 滞后相位角变化曲线

从图 9 可以看出频率为 10 Hz 和 100 Hz 时所对应的幅值与悬臂梁瞬态动力学稳态响应的幅值相同。图 10 表明了滞后相位角与频率的变化曲线, 频率在 0~200 Hz 范围时, 滞后相位角数值变化比较平缓; 频率在接近悬臂梁一阶固有频率 200~300 Hz 时, 滞后相位角急速降低; 频率在 300~500 Hz 时, 滞后相位角数值变化比较平缓。

当频率为 10 Hz 时,滞后相位角为 179.77°,所以图 7 表达的曲线与参考曲线基本重合。当频率为 100 Hz 时,滞后相位角为 177.28°,从图 8 可以看出优化后与未优化的悬臂梁曲线都相对于参考曲线有较小一点的偏移,从而验证了滞后相位角相对于频率的变化趋势。由于纬纱稳定引纬的频率为 10 Hz(即 10 r/s)左右,滞后相位角为 179.77°时,对应的滞后时间大约为 0.05 s。

4 结论

(1)通过 ansys 拓扑优化算法对纬纱张力传感器悬臂梁结构进行优化,提高了悬臂梁的固有频率,增加了悬臂梁响应过程的稳定性,避免了人为多次尝试寻找最优结构的操作,提高了结构设计效率。其中,一阶固有频率提高最为明显,从 234.46 Hz 增加到 252.35 Hz,提高了 7.63%,体积从 6 526.4 mm³ 减少到了 6 240.1 mm³,降低了 4.38%。

(2)通过在瞬态动力学中分析,对优化后和未优化的悬臂梁在 10 Hz 和 100 Hz 的计算比较,优化后的悬臂梁响应曲线和达到稳态响应需要的时间优于未优化悬臂梁的响应曲线和达到稳态响应需要的时间,并且验证了滞后相位角相对于频率的变化趋势。最终得出频率为 10 Hz 时,滞后相位角为 179.77°,滞后时间为 0.05 s 的结论。

参考文献:

- [1] 曹飞,熊和金.基于 DSP 的纱线张力检测系统[J].电脑编程技巧与维护,2008,(11):71-73.
- [2] SONNTAG E. The use of computer aided measuring technology for ring spinning process system analysis. Part 1: Sensor analysis[J]. Melliand Textilber, 1993,(12):402-404.
- [3] SONNTAG E. The use of computer aided measuring technology for ring spinning process system analysis. Part 2: Measuring signal processing [J]. Melliand Textilber, 1994,(3):56-59.
- [4] SONNTAG E. The use of computer aided measuring technology for ring spinning process system analysis. Part 3: Measurements on a high performance ring spinning machine[J]. Melliand Textilber, 1994,(5):87-88.
- [5] CARVALHO V, MONTEIRO J L, SOARES F O, et al. Yarn evenness parameters evaluation: A new approach[J]. Textile Research Journal, 2008, 78(2): 119-127.
- [6] 韦永奇,胥光申.基于单片机的喷气织机纬纱张力测试系统[J].电子测试,2019,(9):34-35,51.
- [7] 秦绍辉,胥光申,沈丹峰,等.基于 LabVIEW 的喷气织机综合性能测试系统[J].西安工程大学学报,2016,30(1):107-111.
- [8] KARNOUB A, KADI N, AZARI Z. Using the expert system to analyze loom performance[J]. The Journal of The Textile Institute, 2016, 6:1-13.
- [9] 庾在海,吴文英,陈瑞琪.纺织过程中的纱线张力测试方法[J].传感器世界,2004,(1):27-29.
- [10] 张楠,景军锋.基于机器视觉的纱线张力检测方法[C]//2016 全国针织技术交流会论文集,2016.
- [11] 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.
- [12] 任泉,李伟,葛松林,等.光纤 Bragg 光栅应变传感器在纱线张力测量中的应用[J].纺织机械,2011,(1):36-39.
- [13] 高晓丁,王旭,戴宝林.基于光纤力传感器的经纱张力测试系统[J].纺织学报,2009,30(6):113-117.
- [14] 郝永健,张团善,周文胜,等.动态纱线张力传感器弹簧片的有限元模态分析[J].西安工程大学学报,2015,29(3):358-361,368.
- [15] 吴震宇,陈琳荣,李子军,等.接触式纱线张力传感器动态测量模型[J].纺织学报,2013,34(8):138-142.
- [16] AHMED N, NINO D F, MOY V T. Measurement of solution viscosity by atomic force microscopy[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(6): 2 731-2 734.
- [17] 周炬. ANSYS workbench 有限元分析实例详解[M].北京:人民邮电出版社,2019.
- [18] 谢伟平,郭漫,孙亮明.线弹性范围内钢悬臂梁的阻尼特性试验研究[J].振动工程学报,2016,29(6):1 011-1 019.
- [19] 朱文静,田伟,张慧芳,等.纱线线密度对 Dornier 喷气织机纬纱飞行速度和状态的影响[J].纺织学报,2012,33(1):121-125.
- [20] 陈雪善,祝成炎,刘磊,等.纬纱运动气流指数与其影响因素的相互关系[J].丝绸,2009,(9):40-41,48.

(下转第 40 页)

加了领型端正,线头修清的要求,对于针织保暖内衣提出宜用弹力缝纫线缝制。

5 其他

5.1 抽样规则

在新标准中,内在质量的采样件数从旧标准的5件减少到4件,不足时可以增加件数。

5.2 判定规则

在新标准的判定规则中细分了批量判定、单件判定。其中新标准的批量判定中内在质量中要求,只要有一项不符合,则判定该批产品不合格。在色牢度项目中不合格者,则分色别判定该批产品不合格。对于增加的单件判定说明,若产品检验件数低于批量判定的抽样件之和,要按照标准规定只对被检样品进行判定,并在检验报告中注明。同时新标准也增加了一条其他规定,即不允许严重影响外观及服用性能的产品,对广大消费者而言更有保障。

5.3 产品使用说明、包装、运输和贮存

在新标准中,产品使用说明除了按 GB/T 5296.4

外,还用 GB 31701 的规定替代 GB 18401 执行。

在新标准中,增加说明若产品有明示保温指标,其检验结果按明示指标判定;若产品没有明示保温指标,其检验结果不能低于本标准要求。

新标准增加了产品运输条款,产品的运输应防潮、防火、防污染;增加了贮存条款,产品宜存放在阴凉、通风、干燥、清洁的库房内,并防蛀、防霉。

6 结语

随着人们生活质量的不断提高,国家也相应地对标准进行不断更新。针织保暖内衣的新标准出台,能够更好地对针织保暖内衣产品进行质量控制,更好地引导企业生产出更符合使用要求的内衣产品。

参考文献:

- [1] FZ/T 73022—2012: 针织保暖内衣[S].
- [2] FZ/T 73022—2019: 针织保暖内衣[S].

Comparative Analysis of New and Old Standards for Knitted Thermal Underwear

NI Bing-xuan, WAN Cui-yun, ZHU Guo-quan

(CNTAC Testing Services (Dongguan) Co., Ltd., Dongguan 532900, China)

Abstract: The Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China issued the new standard FZ/T 73022—2019 "knitted thermal underwear" on December 24, 2019, and officially implemented on July 1, 2020. The differences between the old and new knitted thermal underwear standards were analyzed.

Key words: knitted thermal underwear; standard; comparison

(上接第 37 页)

Structure Optimization of Cantilever Beam Type Weft Tension Sensor

LI Yao-jie¹, SHEN Dan-feng^{1,*}, CHANG Ge-lian², WANG Yu¹, LI Jing-yu¹

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2.Jingwei Tsudakoma Textile Machinery (Xianyang) Co., Ltd., Xianyang 712000, China)

Abstract: The topology optimization algorithm was used to optimize the cantilever beam structure, and the transient dynamics harmonious response analysis was used to verify the improvement of the stability performance of the cantilever beam and the size of the lag time. In the transient dynamics, the cantilever beam before and after optimization was analyzed at 10 Hz and 100 Hz frequency, and the displacement response curve of the free end of the cantilever beam was calculated. In the harmonic response analysis, the relationship curve between the lag phase angle and frequency, and amplitude and frequency in the range of 0~500 Hz was calculated. The results showed that in the transient dynamic analysis, the optimized response curve of the cantilever beam was the closest to the reference curve. The lag time of the cantilever beam at different frequencies could be calculated according to the harmonic response curve.

Key words: yarn tension; cantilever beam; natural frequency; modal topology optimization; harmonic response