

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.01.003

针织选针器小尺度往复摆动特性研究

王罗俊¹, 彭来湖^{1,2}, 史伟民^{1,2}

(1. 浙江理工大学 浙江省现代纺织装备技术重点实验室, 浙江 杭州 310018;
2. 浙江理工大学 现代纺织装备技术教育部工程研究中心, 浙江 杭州 310018)

摘 要:针对针织核心器件选针器的刀头在小尺度内往复摆动时双稳态特性差异大,导致选针工作不稳定的问题,分析选针器工作原理,构建三维及力学模型,研究选针器刀头小尺度范围内往复摆动,刀头与挡板撞击的完整过程及动力学特性。在剖析刀头摆动及撞击2个阶段运动特性的基础上,采用高精度激光位移传感器、应变片测力装置以及激光多普勒测振仪等精密仪器对其刀头的往复摆动和与挡板的撞击过程进行测量;利用 LabVIEW 和 MATLAB 等软件对采样的数据进行处理、分析及特性曲线重构。得出了选针器工况作业指标和针对刀头摆动及撞击2阶段的力学特性,并在实验及理论数据上的校对分析为基于刀头撞击振动检测的选针闭环控制策略提供依据。

关 键 词:选针器;提花;位移传感;应变片测力;激光测振;信号处理

中图分类号:TS183 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)01-0016-08

Research on Dynamic Characteristics of Reciprocating Pendulum Stroke of Knitting Needle Selector

WANG LuoJun¹, PENG LaiHu^{1,2}, SHI WeiMing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Textile Machinery & Technology of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. The Center for Engineering Technology of Modern Textile Machinery & Technology of Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem that when the blade head of the needle selector of the knitting core device oscillates back and forth on a small scale, there is a great difference in the bistable characteristics, resulting in instability of needle selector. The principle of needle selector was analyzed, three-dimensional and mechanical models were built and the complete process and dynamic mechanical properties of the impact between the reciprocating swing of head of needle selector in a small-scale range and the baffle were studied. On the basis of analyzing the motion characteristics of blade head in the two stages of swing and impact, precision instruments such as high-precision laser displacement sensors, strain gauge force measuring devices, and laser doppler vibrometers were used to measure the reciprocating oscillation of the needle selector blade head and the collision process with the baffle. Software programs such as LabVIEW and MATLAB were used to process, analyze and reconstruct the characteristic curve of the sampled real-time data. The operating index of the needle selector in working condition and the mechanical characteristics of the two stages of the swing and impact of blade head were obtained, and proofreading analysis of experimental and theoretical data provided the theoretical basis for closed-loop control strategy of the needle selection based on vibration detection of the impact of the blade head.

Keywords: needle selector; jacquard; displacement sensing; strain gauge force measurement; laser vibration measurement; signal processing

收稿日期:2018-10-08;修回日期:2018-11-25

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U1609205)。

第一作者简介:王罗俊(1993),男,浙江乐清人,硕士研究生,主要研究方向为针织选针器控制技术。E-mail:576657930@qq.com

随着信号处理和传感器技术的发展,计算机控制及检测技术广泛运用于针织设备,作为针织设备的核心配件,电子选针器也处于革新换代的关键时期。近年来,针织生产的高速化和织物产品的高档化,对针织设备,尤其是对电子选针器的工作速度、可靠性和一致性等性能指标提出了更高要求^[1]。

电子选针器分压电式和电磁式2类,其中电磁式又分为电保持^[2]和磁保持2类。磁保持电磁式选针器由于换向力大,往返工作频率快,双稳态靠芯棒磁场保持电路系统不工作因而选针器不发热等特点成为电子选针技术的发展趋势。

目前国内针对选针器的研究主要以浙江理工大学、浙江大学等高校为代表^[3-4],国外以企业工程应用产品开发为主。对选针器性能研究的侧重点大多在于利用外部独立系统对选针器内部驱动模块的运转情况进行检测分析,提出利用频闪原理来设计选针器频率检测系统,该方法适用于人工快速判断^[5],但通用性不高。而对选针器刀头运动特性研究和摆动过程状态的分析较少见,但刀头摆动过程及运动状态又是选针器双稳态特性差异的内在原因,因此对选针器刀头摆动碰撞动态过程进行研究具有积极意义。

课题组对选针器刀头摆动碰撞动态过程进行三维力学建模。在此基础上,用高精密仪器对选针器小尺度往复摆动过程进行实时数据检测采集,利用LabVIEW等软件对数据进行拟合分析,研究刀头往复摆动过程中摆动及撞击2个阶段的运动力学特性,为针织圆纬机提花选针闭环控制提供实验及理论基础。

1 针织电磁选针器工作原理及性能要求

针织电磁式选针器的三维物理模型如图1所示。根据选针器工况需求,刀头需要依据花型设计要求处在提花和不提花工作状态,即刀头绕固定轴摆动到上限位置和下限位置(双稳态位置)。而刀头往复摆动的驱动力由镶嵌在刀头另一端的永磁体和与之相对的电磁铁之间的吸、斥磁力提供。永磁体由2块极性相反的永磁铁合并构成,产生平行永磁铁端面的恒定磁场。电磁铁由铁芯和线圈组成,铁芯为半永磁材料,可以长时间保持当前磁性,磁场方向垂直于永磁铁端面,线圈可以正反通电。由电磁感应定律可知线圈通过电流时可产生磁场,磁场瞬间作用于铁芯,使铁芯磁化并保持与线圈通电方向对应的磁性。铁芯保持的磁场与永磁体产生相斥或相吸的作用力,进而驱动刀头绕固定轴摆动。

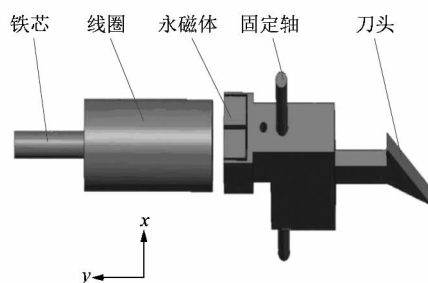


图1 电磁式选针器执行模块

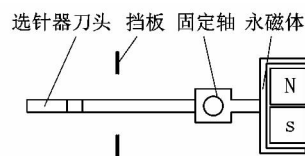
Figure 1 Executive module of magnetic holding electronic needle actuator

2 选针器刀头往复摆动力学建模及实验

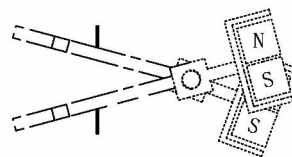
2.1 刀头往复摆动撞击建模

刀头摆动机构模型如图2所示。图2中刀头绕固定轴转动,根据机构运动特性,简化刀头物理结构只考虑质量,将其等效成杆件。质心在 c 点上, L_{oc} 为 0.9779 mm , om 为选针器刀头部分向上摆动到上限位时的位置, o 为固定轴中心, L_{op} 为刀头处于上限位时与挡板的碰撞点 p 之间的距离, L_{oc} 为固定轴到刀头质心的距离。

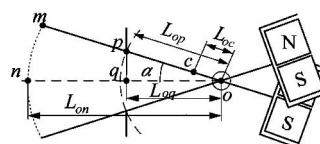
从刀头前端面与针踵的力作用开始点分析,给定刀头长度和固定轴位置。设计电磁式选针器刀头摆幅的垂直距离为 2 mm , L_{on} 为 11.8 mm , L_{oq} 为 5.5 mm ,则由反三角函数可知刀头半摆幅度 α 约为 4.86° ,则 L_{op} 为 5.52 mm 。



(a) 选针器刀头实体模型



(b) 选针器刀头摆动示意图



(c) 选针器刀头简化分析图

图2 刀头摆动行程机构模型

Figure 2 Section model of blade swing

2.2 基于激光三角法的位移测量原理

利用激光三角测量法测量选针器刀头运动轨迹的原理如图3所示。传感器内部半导体激光发射器发出的红色平行光经过透镜后射到选针器刀头的表面,产生的漫反射光线中的部分光线将通过高精度物镜单元成像在线阵 CCD(图像传感器)的光敏面上^[6]。当刀头按照一定频率摆动时,光斑会沿着入射光轴移动,刀头表面的反射光斑相对于光敏元件的位置也发生变化,因此测量 CCD 光敏面上的位移就可以得出刀头摆动的位移:

$$x = \frac{L_1 \Delta x \sin \theta}{L_2 \sin \beta \pm \Delta x \sin (\theta + \beta)} \quad (1)$$

式中: L_1 为高精度物镜单元的物距,即选针器刀头向上摆动到极限点 a_1 与其前主面的距离; L_2 为高精度物镜单元的像距,即其后主面与成像面中心点 b_2 的距离; θ 为 CCD 光敏面与高精度物镜单元轴线的夹角; β 为高物镜单元与发射激光的夹角。

由于选针器刀头绕固定轴进行摆动,即激光与刀头表面是以 $(90 + \alpha)$ 的夹角入射,因此在 CCD 光敏面上成像光斑的质心不是光斑的几何中心,产生一定的偏移。假设选针器刀头表面为理想条件,满足朗伯定理,激光在选针器刀头表面产生的是理想漫反射,测量所得的刀头摆动角度 α 为 4.86° ,则可以根据摆动幅度微小近似将激光位移传感器的测量误差忽略^[7-8]。

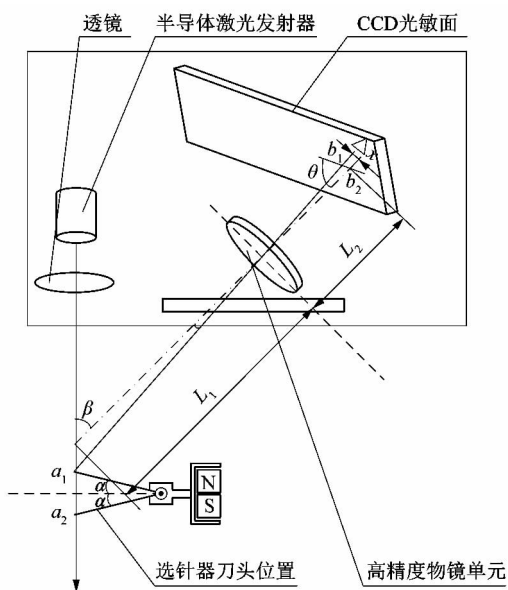


图3 激光三角测量法的应用

Figure 3 Application of laser triangulation

2.3 刀头摆动测量实验

实验采用 Keyence 的 LK-G85 激光位移传感器,具

备活动平衡激光控制引擎(active balanced laser control engine, ABLE)功能;传感器采用 Li-CCD(直线性 CCD)来减少像素边缘误差,提高精准度;同时装配高精度 Ernstar 物镜单元,有效减少像差造成的误差,测量精度为 $0.2 \mu\text{m}$ 。

刀头摆动测量实验平台搭建示意图如图4所示,实际实验平台搭建如图5所示。实验以10刀电磁式选针器为测量对象,每把刀采用线切割加工,外形、质量一致,挡板位置固定;实验前利用水平仪固定好传感器底座以及选针器测试台,以选针器第10把刀做为基准进行实验,将激光位移传感器透射出的光点调整位置到距刀头顶部 0.4 mm 处的表面。

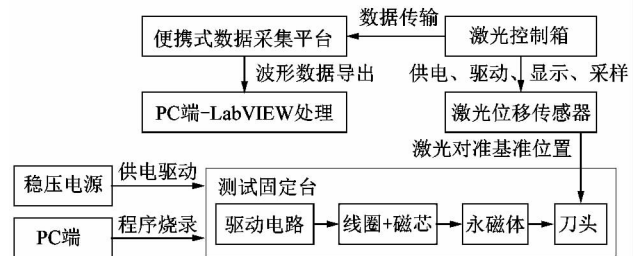


图4 刀头摆动测量实验平台搭建示意图

Figure 4 Schematic diagram of construction of swing measurement experiment platform of cutter head

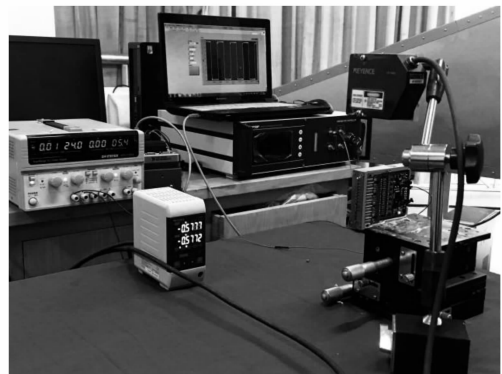


图5 激光测位实验平台

Figure 5 Laser positioning experiment platform

为提高选针器刀头摆动的位移曲线的测量精度和稳定性,选择降低选针器动作频率,使得刀头单次运动过程完全达到稳定状态后再开始下一次往返运动。设置选针器动作频率为 1 Hz ,将激光位移传感器的检测信号传递至激光控制箱,得到的模拟量输出信号通过 CompactDAQ (national instruments 的便携式数据采集平台) 进行采集,电压采样周期设置为 $10 \mu\text{s}$,利用 LabVIEW 进行 500 个刀头动作波形的数据获取及存储。针对完整波形中的上升沿以及下降沿进行数据筛

选分析,分别从 5 000 个采样点中选出 251 个采样点,将电压采样点转换为位移点数据后,部分采样及转换数据如表 1 所示。运用 MATLAB 中的 Curve Fitting 模块对完整数据的采样位移点进行二次拟合得到位移与时间的拟合曲线如图 6 所示。

表 1 部分采样数据转换结果

Table 1 Conversion results of partial sampling data

采集 序号	放大后的电压采集数据/V		位移转换数据/mm	
	刀头向上 摆击过程	刀头向下 摆击过程	刀头向上 摆击过程	刀头向下 摆击过程
...	...	...	...	...
50	-0.801 636	0.107 239	-1.202 450	0.160 850
51	-0.802 277	0.105 011	-1.203 410	0.157 510
52	-0.805 481	0.105 011	-1.208 220	0.157 510
53	-0.776 154	0.107 239	-1.164 230	0.160 850
54	-0.775 513	0.0881 04	-1.163 270	0.132 150
55	-0.775 513	0.086 822	-1.163 270	0.130 230
56	-0.774 567	0.087 463	-1.161 850	0.131 190
57	-0.774 231	0.088 439	-1.161 340	0.132 660
58	-0.774 231	0.086 822	-1.161 340	0.130 230
59	-0.775 848	0.087 799	-1.163 770	0.131 690
60	-0.774 872	0.087 799	-1.162 300	0.131 690
61	-0.773 926	0.086 822	-1.160 880	0.130 230
62	-0.771 362	0.087 463	-1.157 040	0.131 190
63	-0.745 239	0.089 386	-1.117 850	0.134 070
64	-0.743 011	0.066 436	-1.114 510	0.099 655
65	-0.743 652	0.063 568	-1.115 470	0.095 352
66	-0.744 293	0.064 514	-1.116 440	0.096 771
...	...	...	...	...

2.4 刀头摆动过程的实验数据分析

利用 MATLAB 对实验采集所得数据进行二次拟合得到的刀头摆击的动态方程如下:

$$X_{up}(t_1) = 176.2 \times t_1^2 + 0.223\ 60 \times t_1 - 0.001\ 357\ 0; \quad (2)$$

$$X_{down}(t_2) = -222.3 \times t_2^2 - 0.061\ 87 \times t_2 + 0.000\ 228\ 2. \quad (3)$$

对所得曲线方程求一次导数可得实时线速度与时间的关系式。由于线圈通电时间为 $150\ \mu\text{s}$, 时间极短, 因此刀头的摆动过程满足初始位移及初始速度为零的初始条件, 为此将位移方程中的误差系数即 $(-0.001\ 357\ 0)$ 与 $(0.000\ 228\ 2)$ 以及速度方程中的误差系数 $(0.223\ 60)$ 与 $(0.061\ 87)$ 设定为零。选针器刀头在永磁体与磁芯相互作用下的上下极限位之间的摆动过程可分为 2 个阶段:

1) 选针器刀头小尺度往复摆动阶段。根据刀头摆动位移关于时间的上升和下降位移曲线可知, 刀头

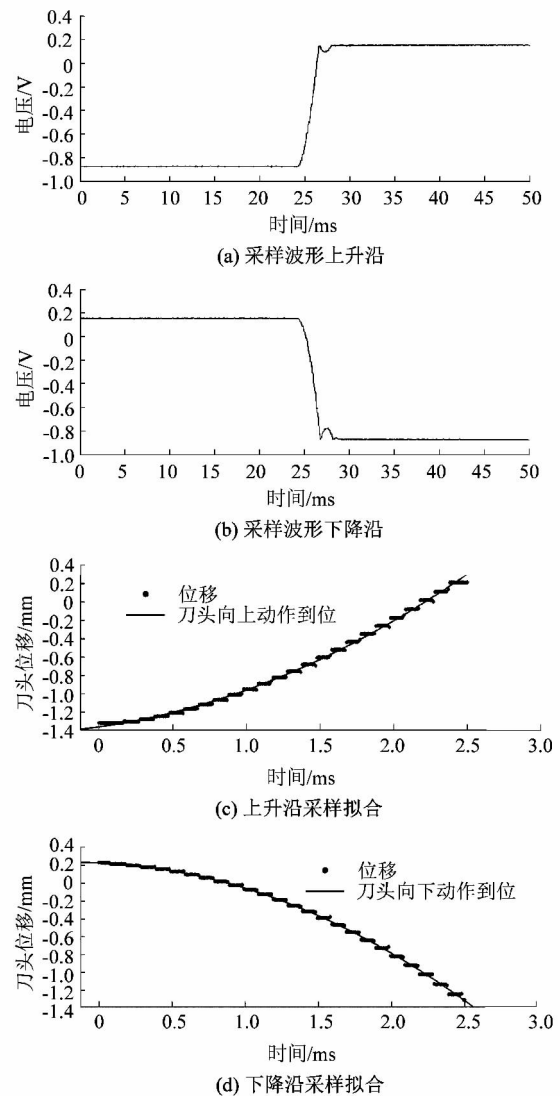


图 6 电压采样波形及位移-时间拟合曲线

Figure 6 Voltage sampling waveform and fitting curve

上下极限位置的位移跃变所耗时间近似相等为 $2.5\ \text{ms}$, 满足圆纬机实际作业指标, 同时也为提高圆纬机工作效率提供了时间余量。当 t_1 和 t_2 为 $2.5\ \text{ms}$ 时, 刀头摆击向上和向下的角加速度 β_{up} 与 β_{down} 分别为 $45\ 179.487\ \text{rad/s}^2$ 与 $-57\ 000.000\ \text{rad/s}^2$ (定义动作向上为正, 向下为负)。

根据刚体绕定轴做圆周运动规律可得关于角量以及初始冲量的分析式:

$$\bar{S}_{begin} = Mt' = I\omega' - I\omega_0. \quad (4)$$

式中: ω_0 为选针器刀头摆击初始位置的角速度; ω' 为铁芯的磁场在线圈通电产生的瞬时冲量给选针器刀头提供的角速度; M 为铁芯磁场产生的磁保持力作用于选针器刀头的力矩; 冲量 $\bar{S}_{begin}$ 为磁场力作用于刀头的瞬

间冲量均值; t' 为冲量作用时间; I 为电磁式选针器刀头部分的转动惯量, 其值近似为选针器刀头部分绕固定轴的惯性矩即 $0.013\ 65\ \text{kg} \cdot \text{mm}^2$ 。

由式(4)可求出芯棒作用于磁钢的实际磁保持力给予刀头初始向上的瞬时冲量 $\bar{S}_{\text{up1}}$ 以及向下的瞬时冲量 $\bar{S}_{\text{down1}}$ 的绝对值分别为 $9.250\ 5 \times 10^{-8}\ \text{N} \cdot \text{s}$ 和 $1.167\ 1 \times 10^{-7}\ \text{N} \cdot \text{s}$ 。

2) 刀头与挡板微力碰撞阶段。上下摆击到位的角速度 ω_{up} 与 ω_{down} 分别为 $141.615\ \text{rad/s}$ 与 $-150.432\ \text{rad/s}$ 。针对其微力碰撞过程进行分析, 建立准刚体模型, 基于此模型假设, 利用冲量-动量(矩)定理处理刀头与挡板的碰撞过程^[9], 根据刚体绕固定轴 z 轴转动, 刚体转动惯量为 I_z , 则可得冲量矩在 z 轴上的投影式为:

$$I_2 \omega_2 - I_2 \omega_1 = \sum_{i=1}^n m_z(\bar{S}_i^{(e)}) + \sum_{i=1}^n m_z(\bar{S}_i^{(i)})。 \quad (5)$$

式中: ω_1 表示刀头碰撞挡板初始角速度; ω_2 表示碰撞结束角速度; $\sum_{i=1}^n m_z(\bar{S}_i^{(e)})$ 为外部碰撞冲量, 对于 n 个质点组成的质点系, 由冲量定理可得挡板受到内外碰撞冲量的作用, 由于内碰撞冲量是成对出现, 因此 $\sum_{i=1}^n m_z(\bar{S}_i^{(i)}) = 0$, 设 $\bar{S} = \sum_{i=1}^n m_z(\bar{S}_i^{(e)})$, 由图2可得 $\bar{S}$ 作用在 p 点, 则由式(5)推出:

$$\omega_2 - \omega_1 = \frac{\bar{S} L_{op} \cos \alpha}{I_z}。 \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)结合拟合所得数据进行计算可以求得: 刀头动作向上的瞬间冲量为 $\bar{S}_{\text{up2}} = 3.514\ 5 \times 10^{-4}\ \text{N} \cdot \text{s}$, 向下的冲量为 $\bar{S}_{\text{down2}} = 3.733\ 3 \times 10^{-4}\ \text{N} \cdot \text{s}$ 。

通过分析激光测位实验中的采样点数据, 计算碰撞过程时间约 $200\ \mu\text{s}$, 则根据冲量可得挡板对选针器刀头在碰撞过程中的平均反作用力即刀头对挡板的平均力, 计算得到刀头向上对挡板的瞬时作用力的均值 $\bar{F}_{\text{up}} = 1.757\ 3\ \text{N}$, 向下为 $\bar{F}_{\text{down}} = 1.866\ 7\ \text{N}$ 。

本实验的数据与理论推导对刀头往复摆击阶段特性的力学特性进行了解析, 针织选针器刀头往复的小尺度摆动使得其对挡板产生的力具备周期性, 下文将通过实验来测量选针器刀头与挡板碰撞过程产生的力, 并直观地判断这种周期性的力是否稳定, 验证其作为振动检测依据的可靠性。

3 选针器刀头与挡板的碰撞力实验测量

3.1 基于应变片的力测量原理及标定

选取基于“应变效应”测试原理的电阻应变片测

力传感器为本实验的测力工具, 其核心部件为敏感栅, 而形状为栅状的敏感栅采用 $0.01 \sim 0.05\ \text{mm}$ 的金属电阻丝制成。当构件受力产生弹性形变时, 从敏感弹性体感受到外来载荷的变化会传递到应变片的基底, 接着传递到金属敏感栅, 使其发生形变而引起电阻变化, 最后形变将传递到应变片的覆盖层^[10-11]。

实验准备阶段, 通过水平仪将选针器与应变片传感器固定在同一测试平台并调整其相对位置。以选针器1号刀为例, 制作2块挡板, 1块为固定于壳体的上挡板, 挡板下部留出空间可以安放实验所需的传感器; 另1块为下挡板, 挡板上部留出空间, 作用与上挡板相同。根据10刀电磁选针器, 依序制作20块挡板。测力实验模型简图如图7所示。

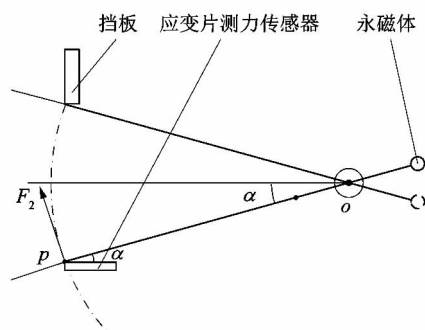


图7 测力实验模型简图

Figure 7 Schematic diagram of experimental model for force measurement

测量选针器刀头向下摆动的冲击力时, 将应变片测力传感器安置在下挡板上方留空的位置处, 上挡板保持不变。由于选针器刀头与挡板碰撞过程中的作用力较小, 导致应变片采集到的模拟电压信号过小(仅为毫伏级), 据此将该信号经过搭建的以 LM358 芯片为核心的二级放大电路进行信号滤波放大处理, 将放大100倍后的模拟电压数据再通过 CompactDAQ 采集器进行采集。实验平台的搭建如图8所示。

选用 $0 \sim 300\ \text{g}$ 量程的悬臂梁电阻应变片测力传感器, 选取量程范围内的11个不同质量的砝码对传感器进行标定, 利用 LabVIEW 获取所得数据, 制得标定曲线如图9所示。

3.2 碰撞作用力测量实验

将应变片测力传感器与选针器刀头的位置调整并利用水平仪固定好, 进行实验:

1) 对于同一把刀, 保证刀头动作到位时与传感器发生碰撞, 采集不同工作频率下刀头碰撞作用力的周期波形; 再更换传感器位置对刀头上下摆动分别进行

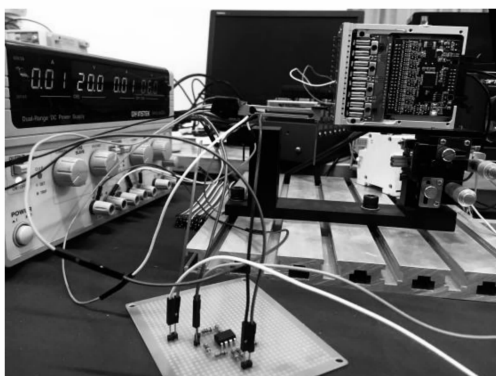


图8 碰撞作用力校对实验平台
Figure 8 Experimental platform of proofreading collision force

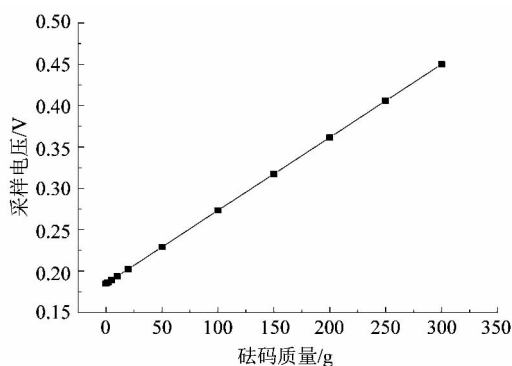


图9 传感器标定曲线
Figure 9 Calibration curve of sensor

实验,根据作用力的误差大小判断是否可以忽略工作频率对作用力的影响。

2) 分别对电磁式选针器1~10刀进行实验。由于生产选针器时,其刀头部分为人工组装,存在一定误差,通过分析不同刀头碰撞作用力的误差确定一个误差范围,建立一个可靠数据模型。

通过LabVIEW编程设置10,50和100 ms时的采样频率来分别对应工作频率为5.0,1.0和0.5 Hz的刀头动作状态,分别记录50个周期的波形即 10^6 个采样点数据。图10为以电磁式选针器1号刀为例,在不同频率下与挡板碰撞产生的力转化为模拟电压信号后的波形,根据波形进行数据的筛选处理,再将所得电压转换为力。

从图10波形可知,选针器刀头与挡板碰撞过程中存在一个尖峰并伴随着一段平稳的波形也就是碰撞瞬间存在一个瞬时力以及电磁式的一个平稳作用力,此瞬时力的大小即作为校对上一实验数据计算结果的核心部分。根据每一把刀6组状态,每组状态50个数据

波形即106个采样数据点,对每个波形中的波峰时段内的约200 μs 长度的采样点进行数据筛选、取均值,再由算法转换为力,依序进行10刀的数据处理。以选针器1号刀为例,在5 Hz工作频率下,刀头下摆的瞬时作用力峰值误差如图11所示,图中的峰值是以200 μs 为基准的采样点集合的均值。

3.3 碰撞作用力实验数据分析

由图11可知,实验所得碰撞过程瞬时力的峰值与计算值误差范围在0.00~0.13 N之间;50个波峰的均值为1.832 04 N,与刀头下摆时的碰撞力的计算值1.866 7 N相比,相差了 3.466×10^{-2} N。为进一步确定实验的误差精度,将选取的10把刀依序在不同频率、方向进行实验测量和解析,所得的整体数据如表2所示。

表2 测力实验数据汇总表
Table 2 Analysis of data from force testing

刀 序 号	碰撞过程的瞬时力/N					
	5.0 Hz 时 力向上	5.0 Hz 时 力向下	1.0 Hz 时 力向上	1.0 Hz 时 力向下	0.5 Hz 时 力向上	0.5 Hz 时 力向下
1	1.759	1.832	1.764	1.841	1.745	1.846
2	1.745	1.826	1.751	1.868	1.702	1.814
3	1.695	1.847	1.737	1.835	1.706	1.812
4	1.732	1.855	1.698	1.814	1.751	1.842
5	1.736	1.839	1.727	1.863	1.689	1.834
6	1.688	1.853	1.733	1.852	1.693	1.799
7	1.748	1.858	1.742	1.818	1.762	1.804
8	1.714	1.829	1.691	1.843	1.722	1.825
9	1.701	1.828	1.689	1.856	1.733	1.835
10	1.753	1.835	1.745	1.823	1.734	1.781

从表2可知,同一把刀在不同工作频率下,刀头运动方向相同时产生的瞬时力误差在0.00~0.05 N之间,可近似忽略其对瞬时力的影响;不同刀头在同一工作频率下,刀头运动方向相同时产生的瞬时力误差在0.08 N范围内。数据表明刀头与挡板碰撞产生的瞬时力较为稳定,能够为碰撞数据模型提供一个峰值力的判断范围。

由于刀头动作幅度较小,因此垂直方向上的作用力大小只有所测力的8.5%。为了直观表现挡板受到此作用力的振动情况,利用单点激光多普勒测振仪LV-S01测量不同工作频率不同刀头与挡板碰撞时,挡板中心点的振动波形,发现其振动位移与速度呈周期性变化^[12-13],表明刀头碰撞瞬时力在垂直挡板的分力的周期稳定性。选2号刀在工作频率为5 Hz时与挡板碰撞,挡板中心的振动波形如图12所示。

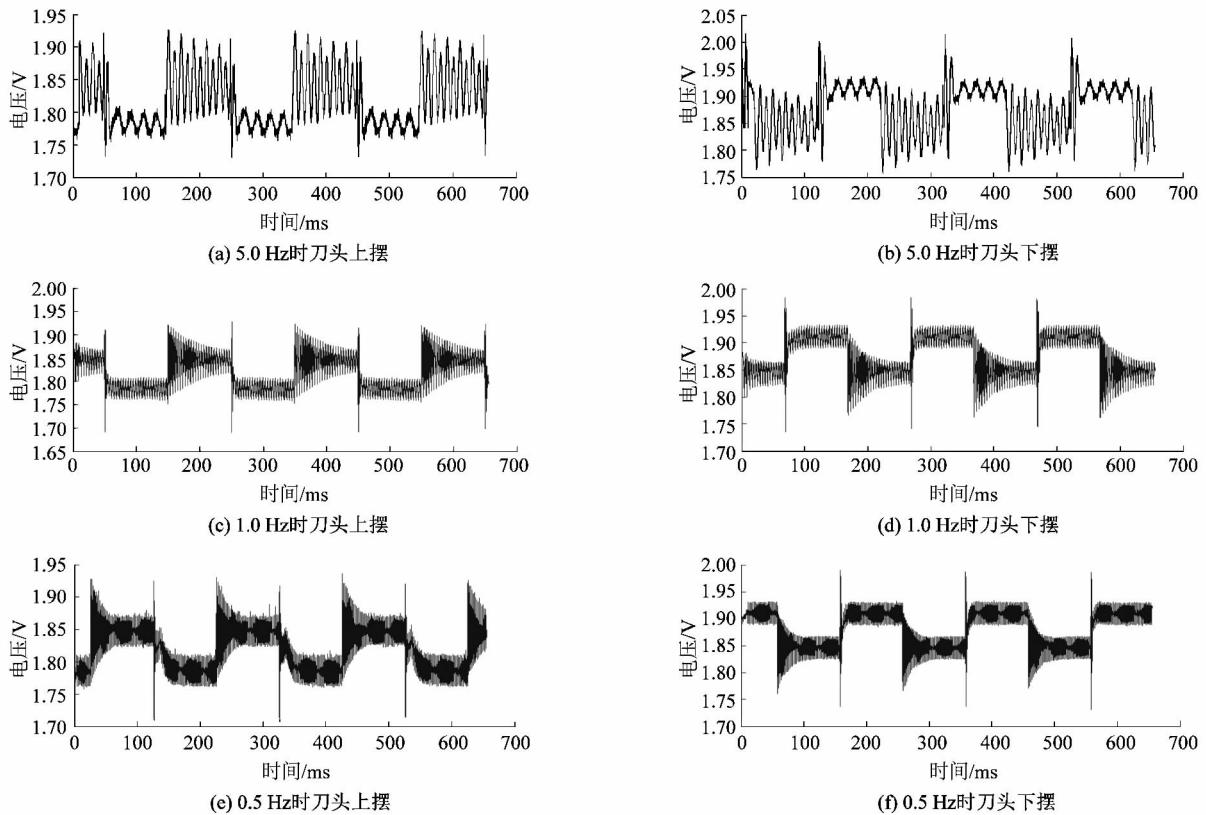


图 10 选针器 1 号刀的采样数据波形

Figure 10 Sampled data waveform of the first blade of needle actuator

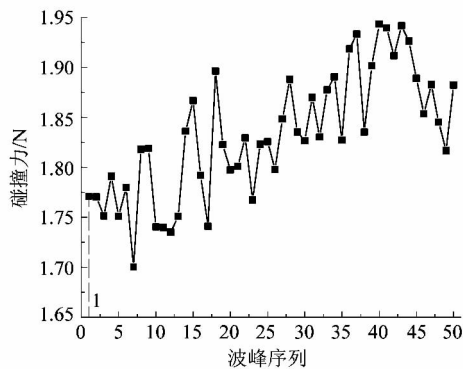


图 11 碰撞瞬时作用力峰值误差图

Figure 11 Peak error chart of momentary force from process of collision

4 结论

课题组以针织选针器工况性能为目标参数,设计 2 类实验:①利用激光三角法采集选针器刀头转动的位移数据,并分析、还原其运动轨迹;利用算法解析刀头与挡板碰撞初始阶段的冲量。②利用应变片测力原理对微力碰撞阶段的碰撞瞬时作用力的校对实验,准确测量刀头小尺度往返摆动和刀头与挡板的微小作用力碰撞 2 种实验数据。选针器刀头在一种稳定位置状

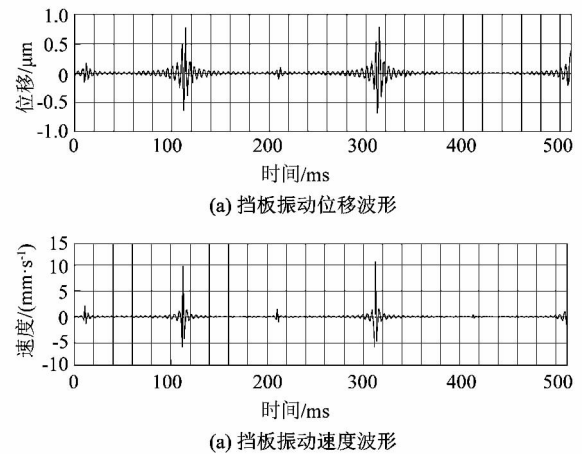


图 12 挡板中心振动波形

Figure 12 Vibration waveform of center of baffle

态与另一稳定位置状态之间相互跃迁运动的过程可分解成 2 个阶段:①第 1 阶段,刀头依靠挡板处于静止状态,受瞬时向上或向下的磁场冲击力,使得刀头获得初始动能,并在此较稳定的磁场力推动下,做匀加速运动,到达另外一种稳定位置,与挡板发生瞬态力的作用前,刀头冲量达到最大值;②第 2 阶段,刀头以最大冲

(下转第 27 页)