

基于压电超声触觉显示的可变摩擦研究

韩凯¹, 李国平¹, 项四通¹, 崔玉国¹, 魏燕定², 娄军强^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院 浙江省零件轧制成型技术重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江大学 机械工程学院浙江省先进制造技术重点研究实验室, 浙江 杭州 315474)

摘要: 基于超声波润滑机理和挤压膜效应, 该文提出了一种新型的压电超声触觉显示分析模型, 并进行了理论和实验分析。在高挤压数状态下, 推导出挤压力的解析表达式, 开展了超声触觉显示分析模型振动特性实验和定性、定量摩擦辨别实验, 探究了振动频率和激励电压对摩擦减少的影响, 验证了压电超声触觉显示分析模型显著的减摩擦效果, 为构建触觉显示剪切力模式提供了理论基础。

关键词: 挤压膜效应; 压电超声; 触觉显示; 减摩擦效果

中图分类号: TN27; TP273 **文献标识码:** A

Variable-Friction Study Based on a Piezoelectric Ultrasonic Tactile Display

HAN Kai¹, LI Guoping¹, XIANG Sitong¹, CUI Yuguo¹, WEI Yanding², LOU Junqiang^{1,2}

(1. Zhejiang Provincial Key Lab. of Part Rolling Technology, School of Mechanical Engineering and Mechanics,

Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Key Lab. of Advanced Manufacturing Technology of

Zhejiang Province, College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 315474, China)

Abstract: Using an ultrasonic lubrication mechanism and extrusion-film effect, a new piezoelectric ultrasonic tactile-display analysis model is proposed and theoretically and experiment ally analyzed. Using a high extrusion number, the analytical expression of extrusion pressure was derived. A vibration-characteristic experiment was conducted on the ultrasonic tactile-display analysis model and a qualitative and quantitative friction-discrimination experiment was carried out. The influence of the vibration frequency and excitation voltage on friction reduction was explored and the significant friction-reduction effect of the piezoelectric ultrasonic tactile-display analysis model was verified. This provides a theoretical basis for constructing a tactile-display shear-force model.

Key words: extrusion film effect; piezoelectric ultrasound; tactile display; antifriction effect

0 引言

随着移动设备的迭代升级, 触觉界面领域迎来新的发展机遇^[1]。触觉作为感知外界环境的重要感觉通道, 当受到外界温度、压力、振动等物理刺激时人脑会产生相应知觉^[2]。触觉再现技术是通过机械、电子装置将感知目标的外形、纹理等几何信息, 以及弹性、湿度、粘滞性等物理信息呈现给操作者, 可实现虚拟物体感知及远程操作感知目标等目的。触觉感知系统分布在整个身体表面, 形成其他感知系统无法实现的各种主动性探索, 从而提供人类与环境之间的双向信息交汇^[2]。

目前已知的触觉感知系统构型设计, 其驱动方

式主要以智能材料驱动为主。Feng 等^[3]提出了一款离子聚合物(IPMC)驱动的 10×10 动态触觉感知系统, 通过 IPMC 悬臂梁驱动 PDMS 聚二甲基硅氧烷弹性触点上下凸起。文献^[4]提出了一款压电叠堆驱动的触觉感知模块, 并通过杠杆机构将压电执行器驱动位移放大, 驱动触点上下运动。茅于杭等提出了压电陶瓷驱动及杠杆放大的触觉感知装置^[5]。Sun 等^[6]提出了一种时间可控的压电振动触觉感知系统, 并用于触觉感知和测试。以上研究采用的压电材料为代表的智能材料致动器作为触觉反馈执行器, 具有驱动精度高、输出力大且动态特性好的优点, 但在接触力精度控制、装置集成度及小型化等方面存在不足, 产生的位移量小, 导致操

收稿日期: 2023-10-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975517, 52075273, 51805276); 浙江省自然科学基金资助项目(No. LGF21E050002)

作者简介: 韩凯(1999-), 男, 安徽省亳州市人, 硕士生。通信作者: 李国平(1967-), 男, 湖北省武穴市人, 教授。

作者能感受的触觉效果差。

文献[7-8]指出,摩擦力会产生碰撞和凹陷的触觉感觉,表明通过调节在表面探索期间作用在手指上的摩擦力,可让操作者感受触觉效果。根据挤压气膜产生机理及压电学理论选择,可产生弯曲振动的压电双晶片作为振动主体,将高频电振动转换为高频机械振动的同时,在手指和振动板间产生一层具有托浮能力的挤压膜。在挤压膜作用下,触觉显示分析模型可产生广泛的可控摩擦效果、较强烈的触感与连续细腻的触觉实现效果,从而实现不同的触觉感受,故适用于触觉特征的准确实现。

1 超声触觉显示分析模型的基本结构

本文开发了基于压电陶瓷超声振动的触觉显示分析模型。在设计超声触觉显示分析模型时,必须满足以下标准:

- 1) 结构简单,方便携带。
- 2) 为使装置减摩擦效果明显,初始表面摩擦应较高。
- 3) 共振频率需达到超声级。
- 4) 通过确定激励电压和摩擦减小水平之间的关系,使摩擦可控。

若要减小装置摩擦,最好从相对较高的摩擦表面开始。玻璃界面有更高的摩擦系数,允许创建更广泛的摩擦力范围,且较厚的玻璃覆层增加了谐振频率,在确保工作频率达到超声级的同时不牺牲振

幅,因此选择玻璃覆层作为手指和振动板之间的媒介。

超声触觉显示分析模型的结构简图和简化模型如图1所示。模型主要由压电背衬架、压电陶瓷片和玻璃覆层组成。采用环氧树脂(3M-DP460)将压电陶瓷片(P-51)与玻璃片粘接构成超声波振子,再把超声波振子的压电片边缘粘接到等外径背衬架上进行波节固定。超声触觉显示分析模型的尺寸参数如表1所示。

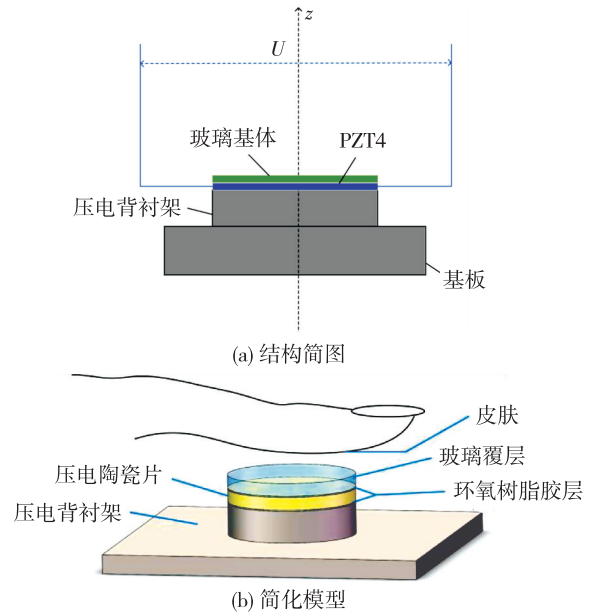


图1 超声触觉显示分析模型结构简图及简化模型

表1 超声触觉显示分析模型尺寸参数

压电陶瓷片		玻璃覆层		压电背衬架支撑部		
半径/mm	厚度/mm	半径/mm	厚度/mm	内径/mm	外径/mm	高度/mm
12.50	2.00	12.50	2.00	∅23.00	∅25.00	5.00

2 超声触觉显示分析模型减摩擦机制理论分析

在工作过程中对压电陶瓷片施加激励信号,在逆压电效应作用下陶瓷片发生形变。压电陶瓷 d_{31} 工作模态具有良好的弯曲振动特性,在压电片径向伸缩位移受限时,转为上下起伏的弯曲受迫振动。当受迫振动达到一定幅值,且拥有超声级的频率时,在振动表面和指尖形成一层具有托浮能力的空气挤压气膜,该挤压膜具备的托浮力将使指尖和振动板之间有效法向力减小,从而手指和振动板间的摩擦力和相对摩擦系数也相应减小^[9-11],相对摩擦系数 μ' 为

$$\mu' = 1 - \frac{F_s}{F_n} \quad (1)$$

式中: F_s 为由挤压膜悬浮产生的挤压力; F_n 为由手指施加的法向力。

为了探究挤压膜悬浮产生的挤压力与表面摩擦系数变化的关系,需要计算由挤压膜效应引起的过压。手指的尖端可以近似看作一个波动的表面,假设平面在垂直方向上呈正弦振荡(见图2),此时应将指纹(或表皮脊)的几何性质考虑在内。由于表皮脊的高度($2h_e$)和间距(L)分别约为 $100 \mu\text{m}$ 和 $350 \mu\text{m}$,故指纹的波动相对于振动板的振动幅值(几微米)不可忽略。

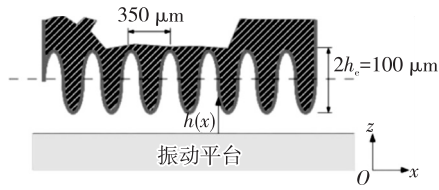


图 2 指尖和振动板模型

由挤压膜效应产生的薄膜厚度 h 是手指的皮肤跟随振动板进行超声波振动时产生的间隙之和。因此, $h = h_v + h_r + h_e$, 其中 h_v 为超声波振动的振幅, h_r 为振动板表面粗糙度峰值, h_e 为指纹波动的幅值。由于手指的脊可以近似看作余弦函数, 则挤压薄膜厚度 h 为

$$h(x, t) = h_r + h_v [1 + \cos(\omega_0 t)] + h_e \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \right] \quad (2)$$

式中 ω_0 为振动板的振动频率。 h 归一化后的气隙可用无量参数表示, 即:

$$H = 1 + \epsilon \cos T + \delta \cos(kX) \quad (3)$$

令 $h_0 = h_v + h_r$, 式(3)中无量参数分别表示为

$$H = \frac{h}{h_0 + h_e} \quad (4)$$

$$X = \frac{x}{R_0} \quad (5)$$

$$T = \omega_0 t \quad (6)$$

$$\epsilon = \frac{h_v}{h_0 + h_e} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{h_e}{h_0 + h_e} \quad (8)$$

$$k = \frac{2\pi R_0}{L} \quad (9)$$

式中 R_0 为振动板与指尖接触的长度。

为了进一步探究挤压薄膜厚度和气体压力的关系, 假设:

- 1) 流体的运动行为由层流粘性流动控制。
- 2) 流体是一种可压缩的完美气体。
- 3) 流动的惯性影响可忽略。
- 4) 相对横向运动为 0。

由上述假设条件可得到一维纳维尔斯托克方程, 将其与连续性和理想气体方程相结合, 推导出无维形式的雷诺兹方程为

$$\nabla(H^3 P^{1/n} \cdot \nabla(P)) = \sigma \frac{\partial(P^{1/n} H)}{\partial T} \quad (10)$$

式中 n 为多向性常数。

结合式(2)、(3)、(10)可定义挤压数 σ 为

$$\sigma = \frac{12\eta\omega_0 R_0^2}{p_0 h_0^2} \quad (11)$$

式中: η 、 h_0 分别为空气的动态粘度和不考虑指纹波动的挤压膜厚度; p_0 为外部环境气体压力。

$$p = \frac{p_s}{p_0} \quad (12)$$

式中 p_s 为挤压膜间隙中压力。

σ 表征挤压膜间隙中气体的可压缩性, 气体可被压缩程度随挤压数的升高而增大, 挤压数随振动频率和挤压膜厚度的变化规律如图 3 所示。

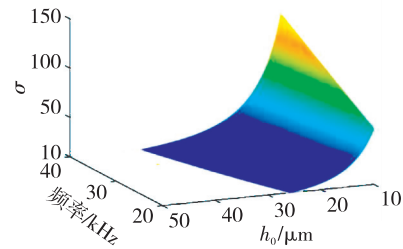


图 3 挤压数随振动频率和挤压膜厚度的变化规律

在低挤压数 ($\sigma < 1$) 条件下, 气体几乎不能被压缩, 而在高挤压数 ($\sigma > 10$) 条件下, 挤压膜中的气体因粘性被困在间隙中无法逃逸, 气体被压缩程度极高, 系统可模拟为一个非线性弹簧气膜, 此时可将 σ 视为 ∞ , 该状态被称为高挤压系数状态。在高挤压系数状态 ($\sigma > 10$) 下, 挤压膜间隙中的压力 p_s 可以达到最大超压 p_{sm} , $p_{sm} \rightarrow \infty$ 。定义挤压膜间隙中的气体压强比为最大超压和外部环境压力的比值, 即 $p_\infty = p_{sm}/p_0$, 此时 $p_\infty = p_{sm}$ 。用 Ω 表示挤压气隙表面的可变位置, 稳态下单位长度的无维平均挤压力 F_s 可表示为

$$F_s = \iint_{\Omega} (p_\infty - 1) d\Omega = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} (p_\infty - 1) dX \right] dT \quad (13)$$

从而推导出挤压力 F_s 的解析表达式:

$$F_s = Ah p_0 (p_\infty - 1) \quad (14)$$

式中 A 为手指与振动板的总接触面积。

式(14)表明, 在高挤压系数状态下, 挤压力 F_s 取决于挤压膜厚度 h 。根据式(11), ω_0 和 h_0 同向变化, ω_0 增大, 则 h_0 增大, 相应地 h 增大, 导致 F_s 变大, 托浮能力变强, 摩擦系数 μ 降低。激励电压是影响指尖和振动表面间的摩擦系数的另一个主要因素。由式(2)可知, 挤压膜厚度 h 随着 h_v 的增

大而增大,而 h_v 跟激励电压成正相关,故 F_s 也随激励电压增大而增大。综上所述,在超声振动作用下,指尖与振动板之间产生的空气挤压膜将产生具备一定程度托浮能力的挤压力 F_s ,从而减小指尖与振动板之间的相对摩擦系数 μ ,挤压气膜减摩擦能力跟振动频率和激励电压呈正比关系,其变化规律如图4所示。

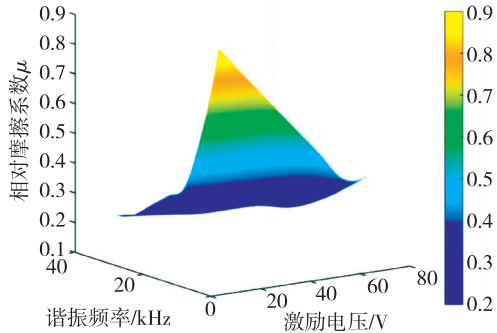


图4 相对摩擦系数随激励电压和谐振频率变化规律

3 超声振动触觉显示分析模型摩擦辨别实验

3.1 超声触觉显示勘探模型谐振频率测定

将超声触觉显示勘探模型固定后,搭建共振响应测试系统如图5所示。测试过程中,信号发生器(RIGOL DG1022U)发出激励信号,该激励信号通过功率放大器(Trek PZD700A,增益倍数为200)放大后输出到压电陶瓷片并使其振动。同时,利用单点激光测振仪(SOPTOP LV-S01)对准玻璃覆层表面中心,以960 kHz采样频率实时获取勘探装置玻璃覆层中心的振动速度,测得的振动信号经过光纤通过网口传输到PC机。

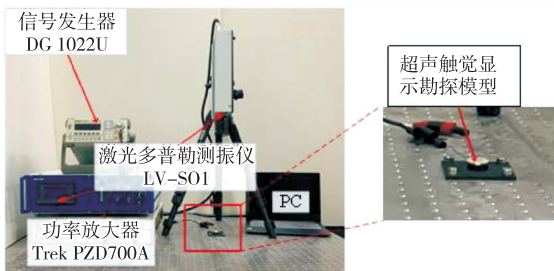


图5 超声触觉显示勘探模型共振响应测试系统

对压电陶瓷片施加电压150 V、频率25~34 kHz的简谐扫频信号,持续时间20 s。测得触觉显示勘探装置的振动响应如图6(a)所示。对采集的振动响应数据进行快速傅里叶变换(FFT)分析处理后,获得其频率响应如图6(b)所示。由图可知,该触觉显示勘探装置的谐振频率为30.8 kHz。

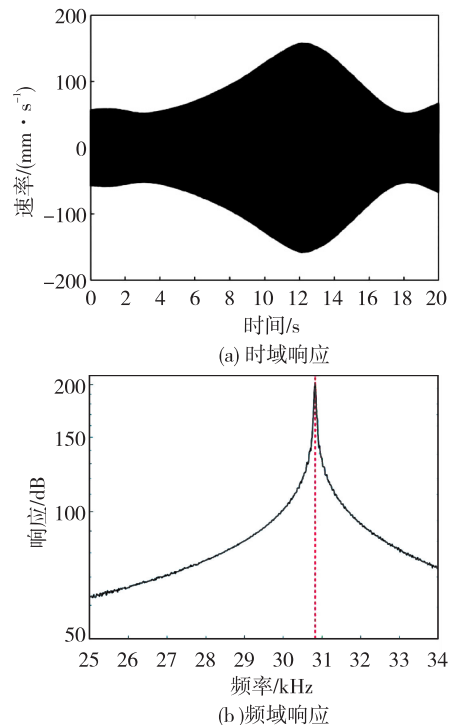


图6 扫频激励下超声触觉显示勘探模型的振动响应

3.2 摩擦减少定性研究

分别选取6名男生和4名女生作为测试对象,年龄分布在22~26岁。实验前确保测试者食指指尖保持洁净、干燥,以避免异物和湿度对实验感受的影响。实验中用黑色布条蒙住测试者双眼,用裸露的食指探索超声触觉显示分析模型的玻璃表面,并在被测试者不知情的情况下不断改变施加在超声触觉显示分析模型上的激励电压。记录在不同实验条件下测试者的实验感受,其结果分布如图7所示。

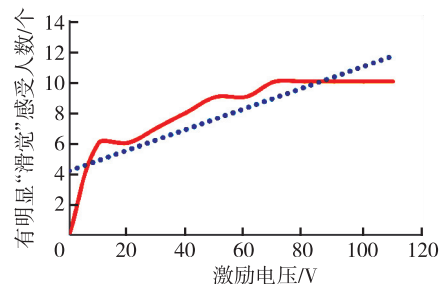


图7 不同激励电压条件下测试者感受分布

实验分析发现,随着激励电压的增大,在指尖与振动板间感受到明显“滑觉”的人数逐渐增多,即测试者指尖与振动板间的摩擦均有不同程度的减少。

3.3 摩擦减少的定量研究

本文开展了可变摩擦实验研究,探究超声触觉

显示分析模型对摩擦减少的效果,构建了从激励电压到显示器表面的相对摩擦系数的映射关系。由库伦摩擦公式可知:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (15)$$

式中: μ 为手指和振动板之间的相对摩擦系数; F_n 为手指和振动板之间的法向力; F_t 为手指和振动板之间的切向力。

由式(15)可知, μ 由 F_n 和 F_t 决定,只需测出 F_n 和 F_t 即可表征超声触觉显示分析模型减摩擦的效果。本文使用两个单轴测重力传感器分别测量 F_n 和 F_t ,实验装置如图8所示。超声触觉显示分析模型被固定在一个测量精度为50g的力传感器顶部,用于测量 F_n 。同时把触觉显示分析模型和另一测量精度为50g的力传感器固定在一个“L”型支架上,该支架连接到一个精密的交叉滑动组件上,利用精密滑动机构和力传感器可测量 F_t 。

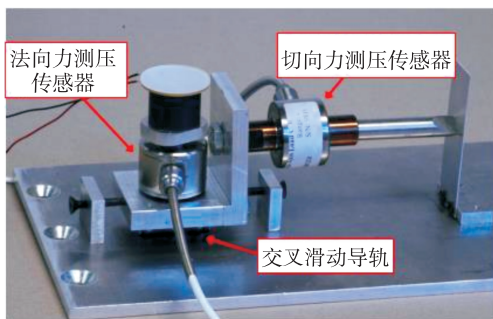


图8 超声触觉显示分析模型摩擦减少量化实验装置

在整个试验过程中,以1000Hz的采样频率收集法向力和切向力。激励电压从0开始,每次追加5V电压,每次激励电压增加5V后记录10组数据。激励电压从0开始逐渐增加至100V,共有20个电压间隔差,共收集了200组实验数据,并利用式(15)计算了 μ 。各激励电压下的相对摩擦系数值如图9所示。数据点代表每个激励电压下10组相对摩擦系数的平均值。当激励电压为0时,相对摩擦系数值约为1.1;激励电压为10V时,相对摩擦系数值为0.3。随着激励电压增大, μ 逐渐降低,当激励电压增加到70V时,相对摩擦系数值逐渐接近平稳值(0.2)。由此可得,激励电压从10V逐渐增加到70V时,手指与振动板间相对摩擦系数逐渐减少,接近平稳。在激励电压从0增加到70V的过程中,相对摩擦系数从1.1降到0.2,实验验证了触觉显示探勘装置较显著的减摩擦效果,且减摩擦效果

具有连续性和平稳性。

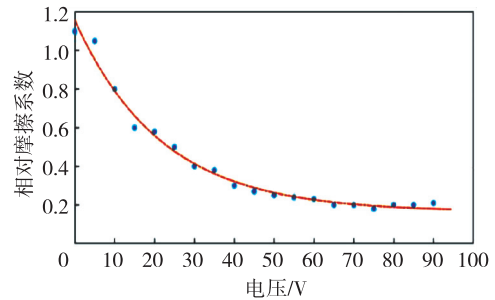


图9 相对摩擦系数随激励电压的变化趋势拟合图

实验表明,利用超声振动和挤压气膜来控制操作者手指与刚性触觉面板间相对摩擦系数(增大、减小或微调),可实现基于双向摩擦力控制的触觉再现。

4 结束语

在超声波振动条件下,人类指尖和超声振动板之间产生具有一定托浮能力的挤压膜。基于超声波润滑机理和挤压膜效应,提出了一种新型的超声触觉显示分析模型。在连续性方程和理想气体状态方程的基础上,结合Reynolds方程,定义了挤压数。在高挤压数状态下,推导出挤压力 F_s 的解析表达式,探究了摩擦减少的两个主要影响因素:振动频率和激励电压。开展了超声触觉显示分析模型振动特性实验和定性定量摩擦辨别实验,验证了超声触觉显示分析模型具有显著的减摩擦效果和广泛的可控摩擦水平,为构建触觉显示剪切力模式提供了理论基础。触觉纹理模式是由空间剪切力模式和速度相关的剪切力模式创建的显示模式,在未来的工作中计划利用超声触觉显示分析模型研究人类手指剪切力模式对触觉纹理的感知。

参考文献:

- [1] 帅立国,陈慧玲,怀红旗. 触觉传感与显示技术现状及发展趋势[J]. 振动、测试与诊断,2016,36(6):9. SHUAI Ligu, CHEN Huiling, HUAI Hongqi. Current status and trends of tactile sensing and display [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016,36(6):9.
- [2] 何聪,邵知宇,曹志勇,等. 振动触觉纹理再现技术研究综述[J]. 测控技术,2020,39(5):21-27. HE Cong, SHAO Zhiyu, CAO Zhiyong, et al. Research summarization of vibrotactile rendering technology for texture[J]. Measurement & Control Technology, 2020,39(5):21-27.

- [3] FENG G, HOU S. Investigation of tactile bump array actuated with ionic polymer-metal composite cantilever beams for refreshable braille display application[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2018, 275:137-147.
- [4] IKEI Y, SHIRATORI M. Texture explorer: A tactile and force display for virtual texture [C]//Orlando, FL, USA: Proceeding of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2022.
- [5] 赵宇, 茅于杭. 盲人人机交互系统的特点和现状[J]. *计算机应用*, 2005(10):2224-2225.
ZHAO Yu, MAO Yuhang. Features and situation of man-machine interaction for the blind[J]. *Journal of Computer Applications*, 2005(10):2224-2225.
- [6] SUN L, OKADA Y. Vibrotactile piezoelectric stimulation system with precise and versatile timing control for somatosensory research [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2019, 317:29-36.
- [7] 郝飞, 陈丽娟, 卢伟, 等. 人手腕部振动强度触觉感知的短时记忆特性[J]. *生理学报*, 2014, 66(6):683-690.
HAO Fei, CHEN Lijuan, LU Wei, et al. Short-term memory characteristics of vibration intensity tactile perception on human wrist[J]. *Acta Physiologica Sinica*, 2014, 66(6):683-690.
- [8] WINFIELD L, GLASSMIRE J, COLGATE J, et al. TPaD: Tactile pattern display through variable friction reduction[C]//Tsukuba, Japan: Second Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2007.
- [9] WIESENDANGER M, PROBST U, SIEGWART R. Squeeze film air bearings using piezoelectric bending elements[D]. Lausanne: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2001.
- [10] WANG Weijia, XIONG Wenzhuo, ZHU Shengjie, et al. method of infrared small target detection based on multi-depth feature connection[J]. *Computer Science*, 2024, 51(1): 175-183.
- [11] FU L, WANG D, WANG X M. Optimization of the monopole acoustic transducer for logging-while drilling [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(10):104301.