

DOI: 10.7652/xjtuxb201812005

柔性可穿戴的腕关节运动角度传感器

李敏, 何博, 徐光华, 陈佳洲, 郭文亮, 郑翔, 张鑫

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为解决难以在柔性康复机器人上安装角度传感器的问题,设计了一种柔性可穿戴的腕关节掌屈运动角度传感器。基于光纤宏弯损耗原理,将光纤嵌入硅橡胶,构成柔性传感模块。硅胶模块与织物结合,组成测量腕关节掌屈运动的角度传感器。该传感器具有对温度不敏感,不受电磁干扰,成本低,不干扰柔性驱动器工作等优点。设计并制造该传感器,试验验证结果表明,硅胶模块在重复拉伸收缩运动时的重复性误差为 1.42%、迟滞为 1.39%、标定误差为 0.53%。与传统的用量角器测量关节运动角度的方法比较,该传感器的测量误差更低,能够实现实时角度监测,与驱动器组成闭环控制,具有实际的应用价值。

关键词: 腕关节运动;光纤宏弯损耗;柔性传感器;硅胶模块

中图分类号: TP212.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)12-0032-06

A Flexible Wearable Sensor for Monitoring Angles of Wrist Motion

LI Min, HE Bo, XU Guanghua, CHEN Jiazhou, GUO Wenliang,
ZHENG Xiang, ZHANG Xin

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A flexible wearable sensor for monitoring angles of wrist motion is proposed to combine a sensor more easily with the flexible rehabilitation robot. It is based on the principle of optical fiber macro-bending loss that a fiber is embedded in silicone rubber to form a flexible sensing module for measuring the angle of wrist flexion after waving. The sensor has the advantages of being insensitive to temperature, free from electrical interference, low cost, and not interrupting the operation of the flexible driver. Experiments verify that the repeatability error, the hysteresis and the calibration error of the measuring device are 1.42%, 1.39% and 0.53%, respectively. A comparison with a traditional method for measuring joint angle using protractor shows that the proposed sensor reduces measurement error, and can realize real-time angle monitoring and closed-loop control.

Keywords: wrist motion; fiber macro-bending loss; flexible sensor; silicone module

双手在人类日常生活中有重要意义^[1]。腕关节是人体复杂的力学关节之一,实现屈曲和挠尺偏两种运动,对手功能的行使起到重要作用^[2],因此监测腕关节的运动状态有重要的实际应用价值。在医疗康复领域,腕关节的运动姿态监测能够指导医生对

患者的治疗和后续康复训练计划的制定,但目前缺乏对运动姿态的监测^[3-4];在互动娱乐领域,腕关节角度的确定便于计算手部在关节坐标系中的实际位置;机器人表面传感器的发展也有助于机器人的精确控制^[5]。

现阶段人体运动监测传感器根据原理分为电磁式、机械式、光学式、线缆式和基于视频图像的运动监测设备。Ascension 和 Polhemus 等研究的电磁式运动监测系统包括发射器、多个监测传感器、中央处理单元和软件控制系统^[6-7]。该类测量系统对监测环境要求严格,受场景中的金属影响较大,且存在总体体积大、监测传感器必须固定在被试身上、妨碍被试者做复杂运动等缺点,同时设备昂贵、数据采样率和精度较低,不能满足快速运动的需求。文献[8]中机械测量装置由固定在人体主要关节的刚性连杆组成,在转动关节处放置角度传感器,通过人体的运动来驱动监测系统工作。此类传感器采用机械结构,体积大、质量重,对被试的动作阻碍较大。VI-CON、NDI Polaris Spectra 等光学运动捕捉系统是将 Marker 点贴在被试身上,通过追踪标记点的运动轨迹来完成监测任务^[9-10]。该类系统存在自遮挡问题,容易造成数据丢失,且后续需进行大量的数据处理。数据手套^[11]主要用于手部位姿的监测,目前已经开发出基于压电效应、光电效应和电磁效应等不同原理的数据手套^[12-14],但数据手套的价格较高,且主要监测手指的运动状态,忽略腕的运动姿态感知。以 KINECT 为代表的深度摄像头的问世为图像处理的方式提供新的发展思路^[15],但存在自遮挡和精度低的缺点。

近年来,用于测量关节角度运动的光纤传感器发展迅速。Silva 等人提出光纤与织物相结合的设备来测量肘关节的弯曲^[16],但该穿戴设备与人体关节部位未能紧密贴合时有较大的测量误差。Sareh 等人应用光纤宏弯损耗的原理,将 3 组光纤平行分布在圆柱形柔软机器人的侧表面以检测该机器人轴线的弯曲角度^[17],试验证明该传感器重复性好,但误差大。Augustin 等分别将光纤宏弯传感器、布拉格光纤、反射式光电传感器 3 种传感器编织在织物上,通过测量呼吸时腹围的变化,监测呼吸作用在磁共振成像环境中的潜在影响^[18]。Back 和 Xie Hui 等分别利用双光纤反射式光强调制机理,设计用于微创手术触诊的伪触觉传感器^[19-20],该类传感器具有结构简单、容易制造和小型化,且重量轻、可灭菌、兼容磁共振环境的优点。考虑光纤经过编织后的传感器具有伸展压缩的特性,且对温度不敏感、不受电子干扰的优点,设计并制作灵敏度高、成本低的光纤传感器有很大的市场价值。

因此,本文利用光纤的宏弯损耗特性设计传感器测量腕关节掌屈运动角度。设计时,首先选择合

适的光纤及最小弯曲半径,以此为基础制作硅胶模块,开展基于皮肤伸缩的关节角度监测试验和人造皮肤模块的拉伸试验,最后分析设计人造皮肤模块穿戴装置并进行标定试验,以验证该监测装置的可用性。

1 手腕运动监测装置的总体设计

1.1 手腕模型分析

硅胶人造皮肤监测装置需要直接贴合在人体手腕上,为确保设计准确性和监测高效性,需对手腕的解剖学结构组成和运动形式进行分析。

手腕是连接人体手掌和小臂的重要部位,由骨骼、韧带、关节,肌肉和肌腱组成。腕部靠近小指的一侧称为尺侧,靠近拇指的一侧称为桡侧。腕关节前后、两侧均有韧带,可做屈、伸、展和收运动。腕内收是掌向桡侧屈曲,腕外展指掌向尺侧弯曲,背伸指手掌向手背侧面伸展,掌屈是掌向手心面屈曲。其中,由于桡腕掌侧部分的韧带较为坚韧,因此掌屈的幅度要小于背伸的弯曲角度。手腕的掌屈和背伸运动配合肘关节运动能够满足人们基本的生活需求。因为监测掌屈运动的设备布置在小臂相反的方向即可监测背伸运动角度,所以本文以手腕的掌屈运动为研究目标。本文中手腕监测的 0° 定义为人手手背和小臂在同一条直线上的状态(图 1 中虚线部分所示的腕关节姿态)。由于大部分测试者的掌屈运动范围为 0°~60°,因此本文的测量范围确定为 60°。

1.2 基于皮肤伸缩的关节角度监测原理

本文腕关节掌屈运动监测原理如图 1 所示。腕关节由虚线位置转动到实线位置时,皮肤表面的 B 点运动到 C 点,加大了与 A 点的距离。本文通过测量皮肤表面固定点 A、B 之间的距离来间接实现关节运动角度的监测。

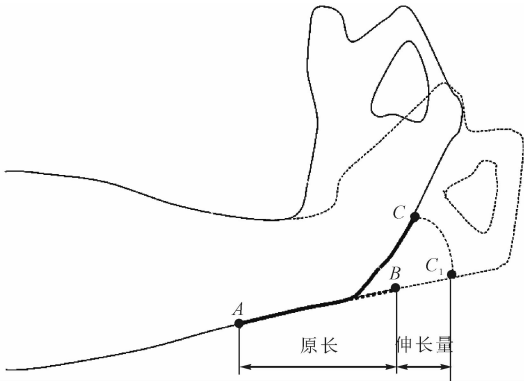


图 1 关节运动角度监测原理

测量距离的装置是以光纤宏弯损耗为机理的硅

胶模块。光纤宏弯损耗是指在光纤弯曲时,光束在光纤内部不满足全反射条件,折射到包层和保护层从而造成光强损耗的现象。

本文将光纤嵌入到硅胶模型后与腕关节贴合,使腕关节做掌屈运动时,关节两侧的固定点之间的距离转换为硅胶模型的伸缩,并引起光纤宏弯损耗,影响光强的变化。通过测量光强的大小来间接确定关节运动角度。

1.3 腕关节运动角度监测装置样机设计

1.3.1 硅胶模型的制作 在制作硅胶模型时,需要预先将光纤布置在未固化的硅橡胶中,因此需要设计浇筑模具以固定光纤。

本文选用的光纤为三菱 SH1001 系列。光纤由纤芯和包层组成,纤芯材料为聚甲基丙烯酸甲酯树脂,纤芯直径为 217~263 μm。包层由氟化聚合物构成,外径为 1 μm。该光纤包层的反射率为 1.49。研究表明,该型号光纤在弯曲半径为 5 mm 以上、10 mm 以下会发生宏弯损耗^[17],因此本文设定光纤的最小弯曲半径为 5 mm,以不损害光纤的前提下保证光纤传感器的灵敏度。

为使硅橡胶液体能够均匀流动到模具中,本文对布线引导槽预留切口。同时,在模具表面设计阵列的柱状凸起结构,使后续制备的模块中分布小孔,保证硅胶模块的伸缩性和穿戴时手部良好的透气性。最终设计的结果如图 2 所示。

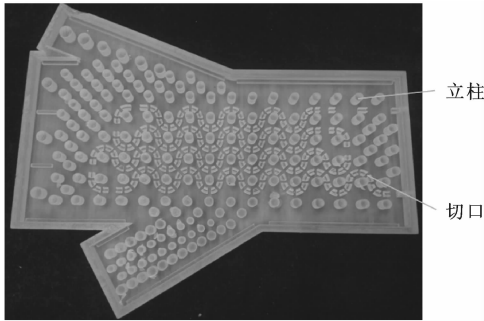


图 2 硅胶模型模具

硅胶模型采用 Ecoflex00-30 系列硅橡胶材料,将 A、B 两种质量密度均为 1.07 g/mm³ 的材料等比例混合,在 25 min 内将混合好的液体浇筑到模具中。用 SolidWorks 软件计算浇筑需要的硅胶体积为 62 576.13 mm³,需要每种材料的质量为 33.49 g。制作设备如图 3 所示。制作时先将光纤固定在模具的引导槽中,考虑杯壁上会残留部分材料,分别称取 A、B 材料 35 g 并充分搅拌,由针管将混合均匀后的材料浇筑到模具中。然后,把盛有液态硅橡



图 3 制作硅胶模型的主要材料和设备

胶的模具放入真空装置中,以减少固化成型后硅胶模块的气泡和孔洞。观察到没有气泡冒出时,将模具从真空装置中拿出,放在室温自然固化 4 h 后从模具中取出硅胶模块。

1.3.2 穿戴装置的设计与制作 硅胶模块制备完成后,需要设计穿戴装置,以便将硅胶模型固定于手腕上,物理样机如图 4 所示。本文采用护肘与人体手臂直接贴合,设计指环和夹持装置带动硅胶模块做伸缩运动。光纤放大器固定座将光纤传感器与护肘贴合。其中光纤传感器采用基恩士公司生产的 FS-N11MN 光纤传感器,输出电压为 1~5 V。同时该传感器自带波长为 630 nm 的光源,具有抗干扰、功耗低、体积小且重量轻的特点。

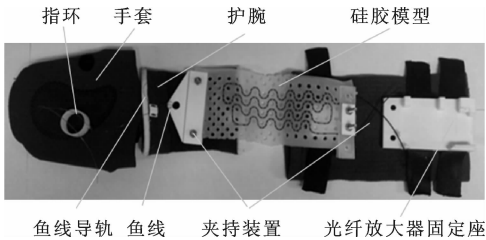


图 4 腕关节掌屈运动传感器

2 腕关节运动监测装置特性验证

为了测量拉伸距离与光纤光强损耗的对应关系,搭建了如图 5 所示的基于步进电机控制的硅胶

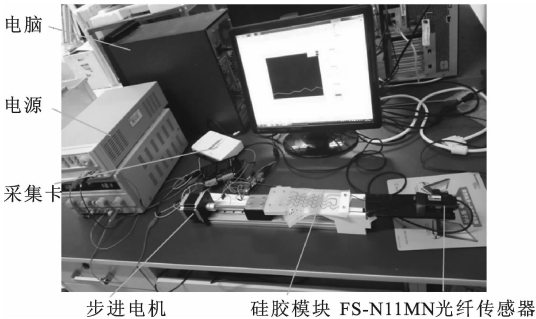


图 5 硅橡胶模型拉伸试验台

模块拉伸试验台。

试验时,设定滚珠丝杠的滑块移动范围为 30 mm,带动硅胶模型做 10 次匀速拉伸收缩运动并用计算机通过 NI 采集卡记录光纤放大器输出的光强数据。将横坐标拉伸位移 0~30 mm 表示硅胶模型正行程拉伸,−30~0 mm 表示反行程收缩,确定位移与光纤放大器输出电压关系如图 6 所示。

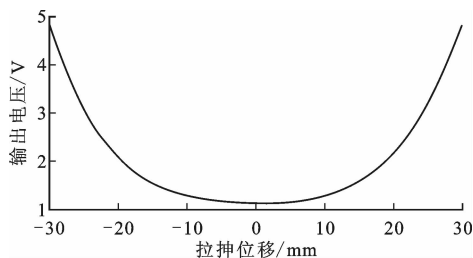


图 6 拉伸距离与输出电压的变化关系

计算重复性误差

$$\gamma_R = \pm (\Delta_{R,\max} / y_{FS}) \times 100\% = 1.42\% \quad (1)$$

式中: γ_R 表示重复性误差; $\Delta_{R,\max}$ 表示同一方向多次测量的输出值的最大差值; y_{FS} 表示输出值的满量程值。

计算迟滞

$$\gamma_H = \pm 0.5 \times (\Delta_{H,\max} / y_{FS}) \times 100\% = \pm 1.39\% \quad (2)$$

式中: γ_H 表示迟滞误差; $\Delta_{H,\max}$ 表示正反行程中同一输入量下输出值的最大差值。

一般仪器设计中参考重复性误差和参考迟滞性误差规定小于 5%，硅胶模块符合仪器设计原则。图 6 表明,多次测量中重复性误差为 1.42%，光纤宏弯损耗性质稳定;在拉伸距离小于 30 mm 时,输出电压与拉伸距离成线性变化,理论可以测量的距离范围可以达到 30 mm。

3 腕关节运动角度传感器的验证

3.1 基于皮肤伸缩的关节角度监测

应用腕关节角度测量装置之前,需要确定腕关节两侧固定点之间的距离变化与腕关节运动角度变化的关系。本文设计了一个如图 7 所示的穿戴装置进行试验测量。试验时,将回复弹簧的一端固定在小臂,指环套在中指,使牵引线尽量保持在一个平面

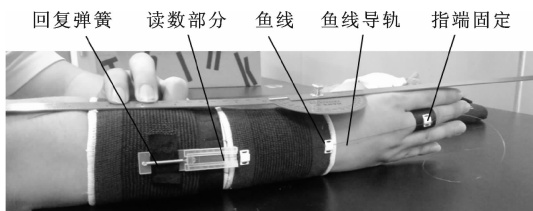


图 7 腕关节角度与固定点距离变化试验图

内,调整牵引线长度,在手腕上寻找屈曲运动转动中心并标记,通过量角器测量腕关节屈曲角度,并测量拉线标记点与初始标记点间的距离。分别对 5 名测试者进行了 3 次试验,每次试验从 0°开始到 60°停止,每间隔 10°记录一次数据。对试验数据进行线性拟合,拟合公式为

$$Y_1 = 0.2444X_1 + 0.8707 \quad (3)$$

式中: X_1 表示关节运动角度; Y_1 表示固定点之间的相对距离。

该直线拟合优度 $R^2 = 0.9565$ 。对每个被试各组数据进行拟合,计算得到腕关节变化范围在 60°时,两固定点间的距离变化量在 14.87 mm 到 16.95 mm 之间,单组数据进行线性拟合的拟合优度 $0.9438 < R^2 < 0.997$,说明在腕关节弯曲运动中,关节角度变化与皮肤表面两固定点间距离变化成正相关。该试验结果证明了本文所设计的硅胶模块满足腕关节角度测量范围。我们将试验数据拟合,得到腕关节运动角度与位移的关系曲线如图 8 所示。

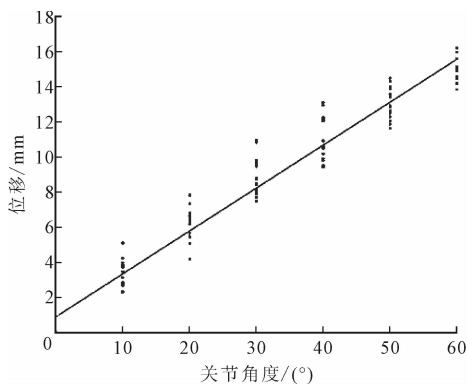


图 8 腕关节运动角度与位移的关系

3.2 腕关节运动角度传感器标定

在使用该设备之前,需要对穿戴装置进行整体标定。随机选取测试者,测量他的腕关节最大弯曲角度为 70°,表面皮肤拉伸距离为 17.5 mm。选取滚珠丝杠移动端位移为 10 mm 到 27.5 mm 的范围代表需要测量的表面皮肤拉伸距离,将其转换为 0°~70°范围内,图 9 为手腕掌屈运动角度与输出电压的变化关系曲线。将该曲线作为传感器特性曲线,确定其函数公式为

$$Y_2 = 0.0006001X_2^2 - 0.003542X_2 + 1.391 \quad (4)$$

式中: X_2 表示腕关节弯曲角度; Y_2 表示在该角度下光纤传感器的测量电压。曲线的拟合优度 $R^2 = 0.9984$ 。

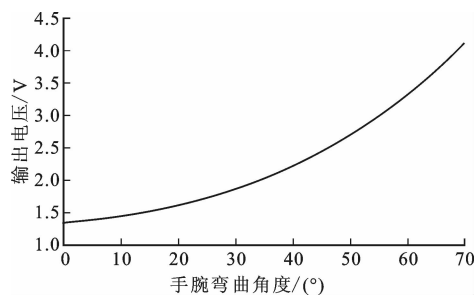


图9 手腕掌屈运动角度与输出电压的变化关系

传感器验证试验是测量手腕在特定掌屈运动角度下的传感器输出值,并与理论分析的结果比较,修正误差。穿戴效果如图10所示。试验时,首先调整牵引线长度使硅胶模型初始拉伸距离为10 mm。以 5° 为间隔,测量穿戴模块在 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 之间的传感器输出电压值,共测量3组。将测量数据进行拟合,与特性曲线对比如图11所示,相对误差为0.53%。

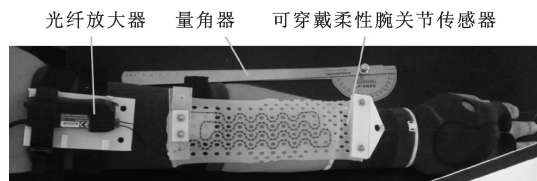


图10 传感器验证试验

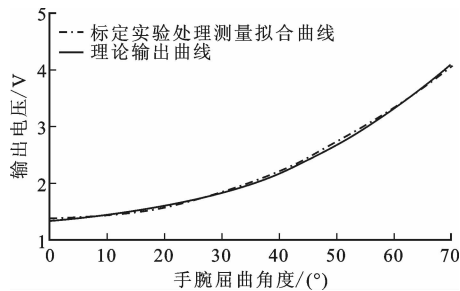


图11 试验拟合曲线和理论曲线的对比

3.3 讨论

标定试验结果中存在一定的误差,主要由于制作的硅胶模块在手腕运动过程中不能实时与小臂紧密贴合,存在摆动现象,使光纤的伸缩运动不在一个平面内。同时,在标定过程中人为的读数误差对结果也会产生影响。

4 结论

本文分析了腕关节的运动形式,提出了用于监测腕关节掌屈运动的柔性光纤宏弯传感器,并详细描述了该装置的制作过程。对原理样机进行了验证,试验结果表明,测量装置的迟滞为 $\pm 1.39\%$,重复度为 1.42% 。制作物理样机并进行标定试验,结

果显示该传感装置能准确地监测手腕掌屈运动角度。在未来工作中,需要探究嵌入的光纤半径对测量结果的影响,并设计导轨,引导硅胶模块做直线运动,使硅胶模块与小臂紧密贴合以减少测量误差。

参考文献:

- [1] HEO P, GU G M, LEE S J, et al. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2012, 13(5): 807-824.
- [2] 徐永清, 钟世镇, 朱青安, 等. 正常腕关节运动学的实验研究 [J]. 西藏医药, 1999, 21(S1): 173-175.
XU Yongqing, ZHONG Shizhen, ZHU Qingan, et al. A kinematic study of normal wrist [J]. Tibetan Medicine, 1999, 21(S1): 173-175.
- [3] 王依晴, 谢叻, 洪武洲. 腕部康复机器人助动训练的力反馈控制 [J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(1): 70-75.
WANG Yiqing, XIE Le, HONG Wuzhou. Force feedback control for assistive mode training of the wrist rehabilitation robot [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 52(1): 70-75.
- [4] 黄明, 黄心汉, 温月, 等. 便携式二自由度腕关节康复机器人设计 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(S1): 329-331.
HUANG Ming, HUANG Xinhan, WEN Yue, et al. Design for portable 2-DOF wrist joints rehabilitation robot [J]. Journal Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(S1): 329-331.
- [5] 宋金雪. 机器人光纤阵列皮肤感知机理及实验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016: 1-2.
- [6] CASTIELLO U. The neuroscience of grasping [J]. Nature Reviews Neuroscience, 2005, 6(9): 726-736.
- [7] WEI X, ZHANG P, CHAI J. Accurate realtime full-body motion capture using a single depth camera [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): 1-12.
- [8] 王嘉锋. 基于人体运动传感的个人定位方法及系统的实现 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 15-18.
- [9] 曾腾辉, 卢健涛. 浅析 Vicon MX 三维动作捕捉系统在健身机器人学运动分析中的应用 [C]//2009 年国际工业设计研讨会暨第十四届全国工业设计学术年会论文集. 北京: 中国机械工程学会, 2009: 73-78.
- [10] 胡超, 葛云, 陈颖. 人体关节活动度测量系统 [J]. 中国医药物理学杂志, 2016, 33(1): 34-38.
HU Chao, GE Yun, CHEN Ying. Measurement system for human joint range of motion [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(1): 34-38.

- [11] DIPIETRO L, SABATINI A M, DARIO P. A Survey of Glove-based systems and their applications [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics: Part C, 2008, 38(4): 461-482.
- [12] STURMAN D J, ZELTZER D. A survey of glove-based input [J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 1994, 14(1): 30-39.
- [13] KIM J H, THANG N D, KIM T S. 3-D hand motion tracking and gesture recognition using a data glove [C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1013-1018.
- [14] HAN Y. A low-cost visual motion data glove as an input device to interpret human hand gestures [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(2): 501-509.
- [15] 刘佳, 郑勇, 张小瑞, 等. 基于 Kinect 的手势跟踪概述 [J]. 计算机应用研究, 2015, 32(7): 1921-1925.
- LIU Jia, ZHENG Yong, ZHANG Xiaorui, et al. Overview of hand gesture tracking based on Kinect [J]. Application Research of Computers, 2015, 32(7): 1921-1925.
- [16] FRAZÃO O. Design and characterization of a wearable macrobending fiber optic sensor for human joint angle determination [J]. Optical Engineering, 2013, 52(12): 992-999.
- [17] SAREH S, NUH Y, LI Min, et al. Macrobend optical sensing for pose measurement in soft robot arms [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(12): 125024.
- [18] GRILLET A, KINET D, WITT J, et al. Optical fiber sensors embedded into medical textiles for healthcare monitoring [J]. Sensors Journal, 2008, 8(7): 1215-1222.
- [19] BACK J, DASGUPTA P, SENEVIRATNE L, et al. Feasibility study-novel optical soft tactile array sensing for minimally invasive surgery [C] // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1528-1533.
- [20] XIE Hui, LIU Hongbin, LUO Shan, et al. Fiber optics tactile array probe for tissue palpation during minimally invasive surgery [C] // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 2539-2544.

(编辑 刘杨)

(上接第 8 页)

- application in fault diagnosis of wind turbine [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13): 103-110.
- [17] 董绍江, 汤宝平, 陈法法. 粒子群优化的多尺度形态滤波器消噪方法 [J]. 重庆大学学报, 2012, 35(7): 7-12.
- DONG Shaojiang, TANG Baoping, CHEN Fafa. Denosing method based on multiscale morphological filter optimized by particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(7): 7-12.
- [18] 唐贵基, 邓飞跃, 何玉灵. 基于自适应多尺度自互补 Top-Hat 变换的轴承故障增强检测 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(19): 93-100.
- TANG Guiji, DENG Feiyue, HE Yuling, et al. Enhanced detection of bearing faults based on adaptive multi-scale self-complementary top-hat transformation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(19): 93-100.
- [19] RANDALL R B, ANTONI J. Rolling element bearing diagnostics: a tutorial [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2011, 25(2): 485-520.
- [20] 江瑞龙. 基于最小熵解卷积的滚动轴承故障诊断研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 15-42.
- [21] LIN Jing, QU Liangsheng. Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis [J]. Journal of Sound & Vibration, 2000, 234(1): 135-148.
- [22] NIKOLAOU N G, ANTONIADIS I A. Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearings using complex shifted morlet wavelets [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2002, 16(4): 677-694.
- [23] HU Z, WANG C, ZHU J, et al. Bearing fault diagnosis based on an improved morphological filter [J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2016, 80: 163-178.

(编辑 杜秀杰)