

基于光纤光栅的摩擦因数测量

任乃奎, 余有龙*, 李玉杰, 蒋昕

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 为测量硅橡胶与接触物间的摩擦因数(COF),以光纤光栅为传感元件,结合硅橡胶及有机玻璃支架,构建滑块型 COF 检测传感器。理论分析了光栅应变测量值与 COF 的关系,滑块滑动时,以光栅的应变均值及应变标准差识别 COF。实验结果表明:当 COF 为 0.34 ~ 0.435 时,应变均值随 COF 递减且最大灵敏度为 $-443.7481 \mu\epsilon/\text{unit}$;应变标准差随 COF 呈指数型递增,最大测量灵敏度为 $284.5672 \mu\epsilon/\text{unit}$ 。此方案可应用于机械手触觉感知领域,应用前景广阔。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 摩擦因数; 应变

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1206004

Measurement of Coefficient of Friction Based on Fiber Bragg Grating

Ren Naikui, Yu Youlong*, Li Yujie, Jiang Xin

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract This study develops a slider sensor in which a fiber Bragg grating is considered to be the sensing element and combined with a silicone rubber and a bracket using polymethyl methacrylate, to measure the coefficient of friction (COF) between silicone rubber and a contact object. Further, the relationship between the strain measured by the fiber Bragg grating and COF is theoretically analyzed. The COF is measured based on the mean value and standard deviation of the strain measured by the fiber Bragg grating when the slider is sliding. Experimental results show that the mean strain decreases with the COF, and the maximum sensitivity is $-443.7481 \mu\epsilon/\text{unit}$ when the COF is 0.34-0.435. Furthermore, the standard deviation of strain increases exponentially with the COF, and the maximum measuring sensitivity is $284.5672 \mu\epsilon/\text{unit}$. The method for measuring the COF can be used in the field of tactile perception with respect to mechanical fingers and has broad application prospects.

Key words fiber optics; fiber Bragg gratings; coefficient of friction; strain

OCIS codes 060.2310; 060.3735; 000.2170

1 引 言

物体匀速运动时,摩擦力与正压力之比为摩擦因数(COF),其与接触面光滑程度、相对运动速度及湿度等有关。COF 关系着机械使用寿命和节能程度。常见的 COF 测量方法有达芬奇经典测量法及其改进法^[1-2]、红外测温法^[3]、振动测量法^[4]、摩擦磨损机法^[5]和侧向力显微镜法^[6]等。达芬奇经典测量法及其改进法^[1-2]依据达芬奇经典滑橇实验原理,测量精度取决于力学传感器精度。红外测温法^[3]通过监测接触区温度场测量 COF,但红外辐射易受环境背景温度及待测物体表面反射率的影响。振动测

量法^[4]利用特定机械结构测量力及加速度进而计算 COF,系统结构复杂。摩擦磨损机^[5]体积大,不宜集成。侧向力显微镜^[6]价格昂贵,主要应用于纳米尺度的测量。光纤光栅(FBG)传感器体积小、柔性好、便于集成、抗电磁干扰、可波长编码,已应用于力^[7]、热^[8]及曲率^[9]等的测量,可有效克服上述方案的缺陷。钱牧云等^[7]利用 FBG 测量正向压力, Cowie 等^[10]采用 FBG 辨别工件表面轮廓, Feng 等^[11]制作了基于 FBG 的指尖滑动传感器,但未用于 COF 检测。本文将 FBG 封装于特定结构的硅橡胶内,以构建滑块型 COF 检测传感器,通过光栅的应变均值(S-M)及应变标准差(S-SD)识别 COF。

收稿日期: 2019-07-31; 修回日期: 2019-08-22; 录用日期: 2019-09-03

* E-mail: youlongyu@163.com

2 传感原理

传感器如图 1 (a)所示,FBG 填埋在固定于有机玻璃 (PMMA) 支架的硅橡胶内。将其置于待测台面,受重力的影响,硅橡胶产生挤压形变;滑动时,摩

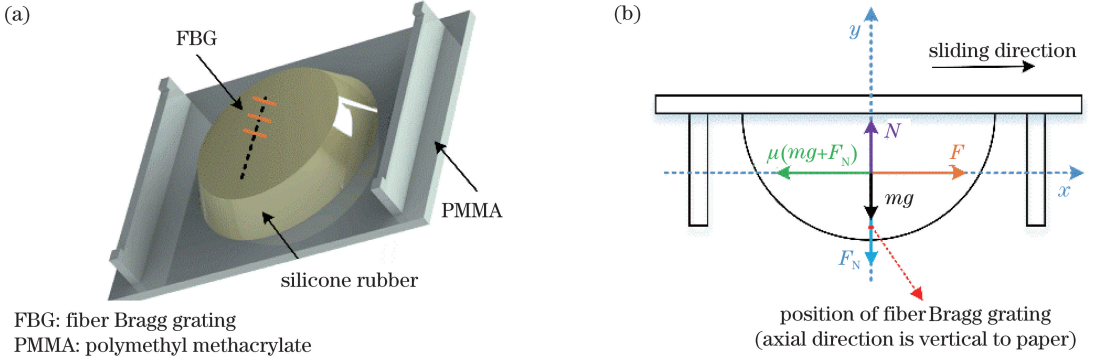


图 1 滑块型 COF 传感器。(a)三维结构图;(b)受力分析

Fig. 1 Slider sensor for COF. (a) Three-dimensional structure; (b) force analysis

滑块匀速运动时,受力如图 1(b)所示。所受支持力 N 等于滑块重力 mg 与滑块上表面法向压力 F_N 之和;水平方向所受拉力 F 等于摩擦力 $\mu(mg + F_N)$,其中, m 为滑块质量, g 为重力加速度, μ 为摩擦因数。封装后 FBG 所受轴向应变为

$$\epsilon = \sigma/E = (\sigma_1 + \sigma_2)/E =$$

$$[\kappa_1(mg + F_N) + \kappa_2\mu(mg + F_N)]/E = (\kappa_1 + \kappa_2\mu)(mg + F_N)/E, \quad (2)$$

式中: E 为光纤杨氏模量; σ 为作用于光栅的轴向应力, σ_1 和 σ_2 分别为由法向力 (mg 及 F_N) 和摩擦力引起的光栅轴向应力; κ_1 和 κ_2 分别为相应转化系数, 其与硅橡胶泊松比及光栅与硅橡胶的耦合强度等参数有关。由(2)式变形得

$$\mu = \epsilon E / [\kappa_2(mg + F_N)] - \kappa_1 / \kappa_2. \quad (3)$$

可见,法向力不变时, μ 与 ϵ 相关。

3 实 验

将球冠状硅橡胶 (高 9 mm、横截面直径 3.6 cm) 模具切开,再将 FBG 绷直悬于距球冠顶点 1 mm 处,最后合并模具并灌入液体硅橡胶混合物

擦力使硅橡胶与台面接触区产生切应变,两者均引起 FBG 波长漂移。恒温时,FBG 相对漂移量 $\Delta\lambda_B$ ^[5] 为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon, \quad (1)$$

式中: λ_B 为 FBG 的布拉格波长; P_e 为有效弹光系数; ϵ 为作用于 FBG 的轴向应变。

(液体硅橡胶取 100 g, 固化剂取 1.5 mL, 硅烷偶联剂取 1.5 mL, 硅油取 3 mL)。待硅橡胶固化后固定于 PMMA 支架,如图 1(a)所示,支架梁尺寸为 7 cm × 5 cm × 2 mm,腿高 7.5 mm。FBG 的布拉格波长、3 dB 带宽及反射率分别为 1555.9300 nm、0.1579 nm 和 89.63%。滑块质量为 79.4 g。本文搭建的 COF 检测系统如图 2 所示。解调仪采样率为 25 kHz。5 种板材包括 PMMA 板、玻璃板、硬纸板、木板(滑动方向与纹路垂直)和泡沫板。实验时板材固定于光学平台,以消除自身弯曲对测量的干扰。在滑块表面中心处叠放重物,以施加稳定力载荷。载荷恒定时,滑块先在板材表面静止 5 s,受电机牵引匀速(0.5655 cm/s)滑动 18 s,最后停止滑动。改变载荷及板材,重复上述操作,测得应变对时间的依赖关系,如图 3 所示。

图 3 中应变测量值均经 Savitzky-Golay 平滑算法^[12]处理。滑块静止时(0~5 s),应变相对稳定;滑行时需克服摩擦力,由于最大静摩擦力大于滑动摩擦力,滑行初始时刻应变瞬时值高于正常滑行的应变值,对应图 3(a)~(e)中 5 s 附近的脉冲。滑块匀

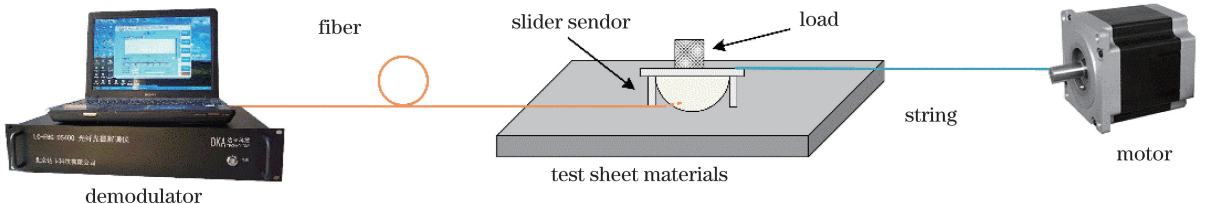


图 2 基于 FBG 的 COF 检测系统

Fig. 2 System for measuring COF based on FBG

速滑动时(5~23 s),应变出现波动的主要原因是板材表面形貌不平整,在光滑表面滑动时,摩擦力主要为黏着效应引起的阻力,应变波动较小。5种板材的表面粗糙度依次增大(表面形貌不平整度变大),由梨沟效应产生的阻力随之增强,且变化显著,致使应变波动现象愈加明显。23 s时,滑块停止滑动,测量值趋于稳定。选取滑块稳定滑动时的应变测量值

(8~23 s)识别 COF,相应平均绝对误差(MAE, E_{MA})和平均相对误差(MMRE, E_{MMR})^[13]如图4所示。可见,MAE和MMRE均随载荷增大而降低,即测量可信度增强。当载荷为0和12 g时, $E_{MA} \geq 4.43 \mu\epsilon$, $E_{MMR} \geq 10.17\%$,可信度较差,这是由滑块与板材未紧密接触造成的。当载荷大于等于24 g时, $E_{MA} \leq 3.07 \mu\epsilon$, $E_{MMR} \leq 4.37\%$,测量可信度高。

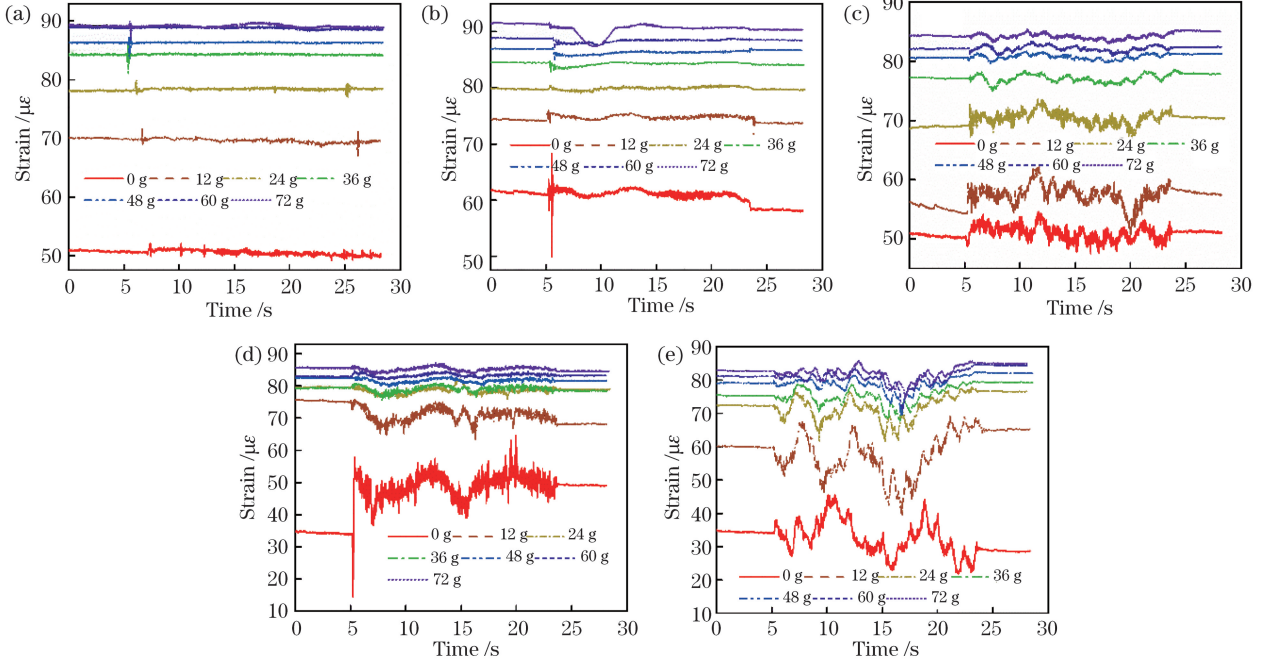


图3 滑块滑动时应变与时间的关系。(a) PMMA板;(b)玻璃板;(c)硬纸板;(d)木板;(e)泡沫板

Fig. 3 Strain as a function of time when slider is sliding. (a) PMMA plate; (b) glass plate; (c) cardboard; (d) wood; (e) foam plate

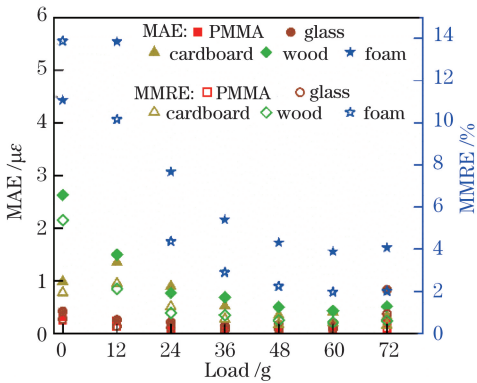


图4 滑块滑动时,应变测量值的MAE和MMRE

Fig. 4 MAE and MMRE of measured strain when slider is sliding

利用斜面法^[14]测量COF,板材以一定倾角倾斜放置,滑块在斜面上无初速度自由滑落,通过文献^[14]的公式可算出,滑行时滑块与5种板材间的滑动摩擦系数 μ_D 分别为0.33961、0.37937、0.40579、0.42433和0.43654。采用图2所示测量系统时,以

稳定滑行时的S-M衡量应变大小,以S-SD衡量应变抖动,两者与COF的关系如图5所示,两者的拟合方程分别为 $\epsilon_m = a_1 + b_1 \times \exp(-\mu_D/c_1)$ 和 $\epsilon_{sd} = a_2 + b_2 \times c_2^{\mu_D}$,其中 ϵ_m 表示应变大小, ϵ_{sd} 表示应变抖动, μ_D 为滑动摩擦因数, $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ 为拟合系数,见表1。

图5(a)中,S-M随载荷递增;载荷恒定时,S-M随COF递减但灵敏度递增。由表1可知,载荷大于等于36 g时,S-M与COF拟合方程的拟合度 $R^2 \geq 0.95174$,适宜测量。当 $\mu_D = 0.42$ 且载荷依次为36, 48, 60, 72 g时,灵敏度分别为-211.2517, -170.2780, -182.1564, -167.2766 $\mu\epsilon/\text{unit}$ 。当载荷为36 g且 $\mu_D = 0.435$ 时,S-M与COF的测量灵敏度最大,达-443.7481 $\mu\epsilon/\text{unit}$ 。

由图5(b)可见,载荷恒定时,S-SD随COF呈指数递增,相应拟合系数见表1,拟合度 $R^2 \geq 0.86784$;测量灵敏度及S-SD均随载荷递减,载荷大

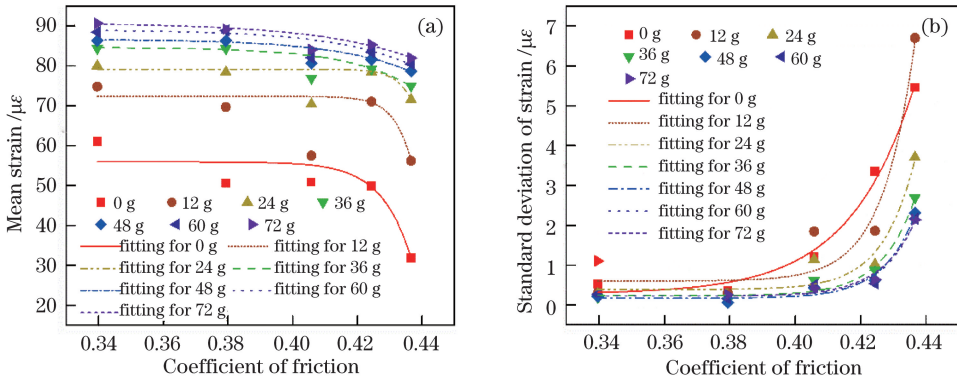


图 5 应变相关量与 COF 的关系。(a) S-M 与 COF; (b) S-SD 与 COF

Fig. 5 Parameters of strain as functions of COF. (a) S-M as function of COF; (b) S-SD as function of COF

于等于 48 g 时,拟合曲线重叠,测量灵敏度近似相等。虽然载荷越小灵敏度越大,但因载荷为 0 和 12 g 时的测量值可信度差,故舍弃相应测量值。当 $\mu_D=0.42$ 且载荷依次为 24, 36, 48 g 时,测量灵敏度

分别为 61.7384, 47.1479, 39.5956 $\mu\epsilon$ /unit。当载荷为 24 g 且 $\mu_D=0.435$ 时, S-SD 与 COF 的灵敏度最大,达 284.5672 $\mu\epsilon$ /unit。此传感器适宜的测量范围为 $0.38 \leq \mu_D \leq 0.435$ 。

表 1 应变相关量与 COF 拟合式系数

Table 1 Fitting coefficients of strain correlation parameters and COF

Load /g	a_1	b_1	c_1	R^2	a_2	b_2	c_2	R^2
0	55.9137	-3.17×10^{-20}	-0.00908	0.63121	0.2724	1.3283×10^{-9}	9.7039×10^{21}	0.98104
12	72.3713	-8.05×10^{-36}	-0.00522	0.80030	0.5981	2.5177×10^{-19}	2.4556×10^{44}	0.90077
24	79.1685	-1.20×10^{-40}	-0.00465	0.91264	0.3832	1.5881×10^{-19}	1.7457×10^{44}	0.86784
36	84.6792	-4.03×10^{-9}	-0.02021	0.99418	0.2314	5.1363×10^{-19}	6.0825×10^{42}	0.95392
48	86.7113	-7.32×10^{-8}	-0.02357	0.98150	0.1665	8.6870×10^{-20}	2.5278×10^{44}	0.95780
60	89.0690	-1.41×10^{-7}	-0.02433	0.95174	0.2214	6.3960×10^{-20}	3.9500×10^{44}	0.92715
72	90.8039	-3.53×10^{-6}	-0.02967	0.98351	0.2103	3.3103×10^{-18}	4.6600×10^{40}	0.94615

4 结 论

制作了基于 FBG 的 COF 检测滑块,提出了以 S-M 及 S-SD 识别 COF 的方法。滑块载荷大于等于 24 g 时,测量值的 $E_{MA} \leq 3.07 \mu\epsilon$, $E_{MMR} \leq 4.37\%$,可信度较高。利用 S-M 识别 COF 时, S-M 随 COF 递减但灵敏度递增;载荷依次为 36 g 和 48 g 且 $\mu_D = 0.42$ 时,灵敏度分别为 $-211.2517 \mu\epsilon$ /unit 和 $-170.2780 \mu\epsilon$ /unit, S-M 与 COF 的最大灵敏度为 $-443.7481 \mu\epsilon$ /unit (载荷为 36 g 且 $\mu_D=0.435$)。利用 S-SD 识别 COF 时,测量灵敏度及 S-SD 均随载荷递减且随 COF 递增;当载荷依次为 24 g 和 36 g 且 $\mu_D=0.42$ 时,灵敏度分别为 61.7384 $\mu\epsilon$ /unit 和 47.1479 $\mu\epsilon$ /unit,当载荷为 24 g 且 $\mu_D=0.435$ 时, S-SD 与 COF 的测量灵敏度最大,达 284.5672 $\mu\epsilon$ /unit。该方案适于测量 $0.38 \leq \mu_D \leq 0.435$ 的 COF,可应用于机器人触觉感知领域。

参 考 文 献

[1] Michielsen S. Device for measuring sliding friction on

highloft nonwovens[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2006, 1(1): 23-31.

[2] Grove G L, Houser T, Damia J, et al. A motorized sliding sled apparatus for measuring the coefficient of friction of human skin *in vivo* [J]. Journal of Wound Ostomy and Continence Nursing, 2011, 38(3): S79-S80.

[3] Mandelis A, Li L, Baddour N, et al. Quantitative measurements of sliding friction coefficients of tribological interfaces with a new differential infrared radiometric instrument [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(1): 407-410.

[4] Sundar S, Dreyer J T, Singh R. Estimation of coefficient of friction for a mechanical system with combined rolling-sliding contact using vibration measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 58/59: 101-114.

[5] Wang W, Sun J J, Tu Q A, et al. Research on the development of the friction and wear tester [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2015, 44(7): 1-6.

王伟, 孙见君, 涂桥安, 等. 摩擦磨损试验机发展现

- 状研究[J]. 机械设计与制造工程, 2015, 44(7): 1-6.
- [6] Echeverrigaray F G, de Mello S R S, Boeira C D, *et al.* Nanoindentation unidirectional sliding and lateral force microscopy: evaluation of experimental techniques to measure friction at the nanoscale [J]. AIP Advances, 2018, 8(12): 125013.
- [7] Qian M Y, Yu Y L. Tactile sensing of fiber Bragg grating based on back propagation neural network [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0806001.
钱牧云, 余有龙. 基于逆传播神经网络的光纤布拉格光栅触觉传感 [J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0806001.
- [8] Tan Z, Liao C R, Liu S, *et al.* Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206007.
谭展, 廖常锐, 刘申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器 [J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206007.
- [9] Zheng D, Pan W, Salvador S. Multicore fiber Bragg grating-based curvature sensor interrogated by matched-filter technique [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328014.
郑狄, 潘炜, Salvador S. 基于匹配滤波解调的多芯 Bragg 光栅曲率传感器 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328014.
- [10] Cowie B, Allsop T, Williams J, *et al.* An optical fiber Bragg grating tactile sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6585: 65850I.
- [11] Feng J H, Jiang Q. Slip and roughness detection of robotic fingertip based on FBG [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 287: 143-149.
- [12] Liu P D, Huang W Z, Zhang W T, *et al.* An EMD-SG algorithm for spectral noise reduction of FBG-FP static strain sensor [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(10): 814-817.
- [13] Morley S K. Alternatives to accuracy and bias metrics based on percentage errors for radiation belt modeling applications [R]. Los Alamos: Los Alamos National Lab, 2016.
- [14] Zhang Y C, Guan Y. Measurement of dynamic friction coefficient for silk fabric by inclined plane [J]. Shandong Textile Science & Technology, 1992, 33(3): 6-8.
张援朝, 关燕. 用斜面滑动法测试丝织物动态摩擦系数 [J]. 山东纺织科技, 1992, 33(3): 6-8.