

# 基于光纤布拉格光栅阵列的刀头磨损实时在线检测

蒋磊<sup>1,2</sup>, 张学智<sup>1,2</sup>, 王进<sup>1,2</sup>, 樊晓军<sup>1,2</sup>, 李雨晴<sup>1,2</sup>, 褚悦<sup>1,2</sup>, 徐棒田<sup>1,2</sup>, 刘铁根<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

<sup>2</sup>光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 针对现有的刀头磨损检测方法检测难度大、无法实时监测的缺点, 提出一种基于光纤布拉格光栅(FBG)阵列的刀具磨损检测新方法。在实验上搭建了多路光纤光栅磨损检测系统, 通过对光纤光栅的定位和波分复用能力进行分析, 得到了可应用于刀头磨损检测领域的嵌入式光学传感器, 将 4 根栅区长度为 3 mm 的 FBG 阵列等间隔分立布置, 并同时解调。利用该方法实现了对磨损长度的在线实时监测, 磨损检测误差在 0.23 mm 以内。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感; 光纤布拉格光栅阵列; 磨损检测; 实时

中图分类号 TH117.1; O43

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1206003

## Real-Time Online Detection of Cutter Wear Based on Fiber Bragg Grating Array

Jiang Lei<sup>1,2</sup>, Zhang Xuezhong<sup>1,2</sup>, Wang Jin<sup>1,2</sup>, Fan Xiaojun<sup>1,2</sup>,  
Li Yuqing<sup>1,2</sup>, Chu Yue<sup>1,2</sup>, Xu Bangtian<sup>1,2</sup>, Liu Tiegeng<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China

**Abstract** To address the shortcomings of the current cutter wear detection methods which have difficulty to detect in real time, a new method based on the fiber Bragg grating (FBG) array for cutter wear detection is proposed. A multi-channel FBG wear detection system is built experimentally. By analyzing the positioning and wavelength division multiplexing capabilities of FBG, an embedded optical fiber sensor which can be used in cutter wear detection field is obtained. Four FBG arrays with 3 mm grating length are arranged separately with equal interval and demodulated simultaneously. The online real-time monitoring of wear length is realized, and the wear detection error is less than 0.23 mm.

**Key words** fiber optics; fiber sensing; fiber Bragg grating array; wear detection; real-time

**OCIS codes** 060.2370; 060.3735; 070.4790

## 1 引 言

工业化水平是一个国家硬实力的标志。在工业化进程中, 金属的大规模加工必不可少。这就导致磨损成为一种常见的现象。特别是在复杂恶劣的地质环境里, 大型刀具的磨损尤为严重。切削刀具的磨损会严重影响工作效率和切削对象的加工质量, 因此务实、高效地实现刀具磨损检测非常重要。现有的刀具磨损检测方法主要可分为直接检测方法和间接检测方法两类<sup>[1]</sup>。直接检测方法, 即直接测量刀具磨损面积或刀具磨损形状的方法, 包括接触检

测法<sup>[2]</sup>、放射线检测法<sup>[3]</sup>, 以及光学检测法<sup>[4-5]</sup>等。这类方法虽然直观, 检测精度高, 但是需要停机检测, 无法在线实时监测刀具工作的全过程。间接检测方法通过监测刀具切削过程中的切削力<sup>[6]</sup>、声发射<sup>[7]</sup>、振动<sup>[8]</sup>、切削温度<sup>[9]</sup>或者电流信号<sup>[10]</sup>等, 然后通过神经网络<sup>[11]</sup>、最大熵与交叉熵理论<sup>[12]</sup>、无线数据传输技术<sup>[13]</sup>、经验模态分解法<sup>[14]</sup>、隐马尔可夫模型<sup>[15]</sup>、小波分解系数统计<sup>[7]</sup>等分析信号的变化, 从而间接推测切削刀具的磨损情况。但该类技术常常不能满足工程应用多通道、实时在线检测等要求。

收稿日期: 2019-05-23; 修回日期: 2019-07-30; 录用日期: 2019-08-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401902)、国家自然科学基金(61735011, 61675152)

\* E-mail: tgliu@tju.edu.cn

近年来,光纤传感技术,尤其是光纤光栅在结构健康检测方面得到了广泛应用。与传统的电气传感器相比,光纤布拉格光栅(FBG)传感技术采用波长编码的方式,具有精度高、抗电磁干扰、对被测量的物理量干扰小、易于埋入工程结构等突出的优点,已经成为光纤传感领域的研究热点<sup>[16]</sup>。光纤光栅传感器普遍用于测量温度<sup>[17-18]</sup>、应变<sup>[17,19]</sup>、应力<sup>[20]</sup>、位移<sup>[16,21]</sup>、加速度<sup>[22]</sup>等诸多物理量。在刀头磨损领域,目前用于磨损量检测的电学传感器易受电磁干扰,且分布在结构外围,工作状态不稳定。但在这些方面,光纤传感均具有很大的优势。

为了实时检测刀具的磨损程度和提高磨损解调的精度,本文提出了一种基于光纤传感技术的在线磨损检测系统。磨损检测传感器以4根3 mm短栅区长度的光纤布拉格光栅阵列(SFBGA)作为传感媒介,通过传感器将长度的磨损转换成光纤光栅反

射谱的变化,同时根据提出的算法进一步解调传感器的磨损量。

## 2 磨损检测系统与信号解调方法

### 2.1 磨损检测系统

多路刀头磨损检测传感系统如图1所示,波长可调谐激光器发出的光经过1×2耦合器一分为二,耦合器分光比为95:5。其中,光强较强的一路光信号经过光纤环形器、光开关,再经磨损检测传感器的反射,反射信号经光电探测器探测进入数据处理系统;另一路经F-P标准具,由光电探测器探测进入数据处理系统,作为波长辅助解调信号。光开关可以使光信号在多路传感器中切换,对解决传感网络中的多点探测、通过波分复用提高测量效率具有重要的工程应用意义。以单路传感器的解调为例,对该系统在复杂环境下的刀头磨损解调能力进行验证。

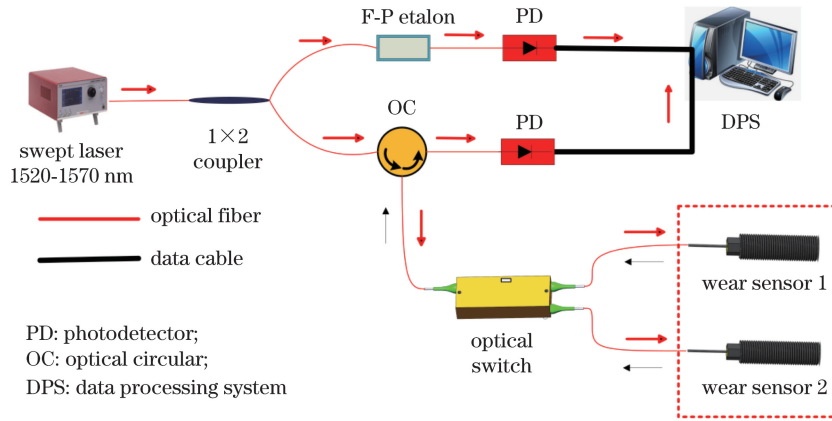


图1 多路刀头磨损检测传感系统

Fig. 1 Multi-channel cutter wear detection sensing system

### 2.2 基于 FBG 的磨损检测原理

在多路刀头磨损检测系统中,核心部分是光纤光栅磨损检测传感器。这种传感器基于光纤光栅的栅区长度与光反射信号的关系来对磨损程度进行检测。为了使传感器工作在最佳状态,需对光纤光栅的栅区长度、折射率调制深度进行优化。

根据光纤光栅耦合模理论<sup>[23]</sup>,FBG 的反射率  $R$  为

$$R = \frac{k^2 \sinh^2(\sigma L)}{k^2 \cosh^2(\sigma L) - \delta^2}, \quad |\delta| \leq k, \quad (1)$$

式中: $L$  是 FBG 的栅区长度; $k$  是模间耦合系数; $\delta$  是波矢偏差, $\delta = \beta - k_B/2$ ; $k_B$  是光纤光栅的布拉格波矢; $\beta$  是传播常数; $\sigma = \sqrt{k^2 - \delta^2}$ 。根据(1)式,最大反射率位于波矢偏差  $\delta = 0$  处,即峰值反射率  $R_P$  为

$$R_P = \tanh^2(kL). \quad (2)$$

根据(2)式,FBG 反射谱的峰值功率和光栅的长度满足双曲正切的平方关系。该关系可以作为光纤光栅定位的解调算法。FBG 峰值反射率的测定公式为<sup>[23]</sup>

$$R_P = 1 - 10^{-\frac{T_{\text{dip}}}{10}}, \quad (3)$$

式中: $T_{\text{dip}}$  是光纤光栅的透射光谱深度,单位是 dB。

光纤光栅是利用光敏光纤的光致折射率变化,将剥除涂覆层的光纤放置于紫外光形成的空间干涉条纹中曝光而形成的空间相位光栅。通常,导波模的折射率  $n_{\text{eff}}(z)$  变化  $\Delta n_{\text{eff}}(z)$  可表示为<sup>[24]</sup>

$$\Delta n_{\text{eff}}(z) = \overline{\Delta n_{\text{eff}}}(z) \left\{ 1 + s \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right] \right\}, \quad (4)$$

式中： $n_{\text{eff}}$ 是光纤的有效折射率； $\overline{\Delta n_{\text{eff}}}(z)$ 是光纤光栅周期的平均折射率变化，可以是沿光栅长度方向 $z$ 的缓慢变化； $s$ 是与折射率调制有关的条纹可见度，通常视光栅的反射率强弱在 $0.5\sim 1$ 取值(强取1,弱取0.5)； $\Lambda$ 是光纤光栅周期； $\varphi(z)$ 是光纤光栅的啁啾或相移。

对于单模光纤布拉格光栅,有<sup>[25]</sup>

$$k = \frac{\pi}{\lambda} s \overline{\Delta n_{\text{eff}}}, \quad (5)$$

式中： $\lambda$ 为波长。根据(5)式可以看出，在光纤光栅刻写的过程中，光纤光栅耦合系数 $k$ 受波长 $\lambda$ 、条纹可见度 $s$ ，以及纤芯的平均折射率变化 $\overline{\Delta n_{\text{eff}}}$ 的制约。由于本研究中所使用的光纤光栅串均为强光栅，因此，针对特定波长的光纤布拉格光栅，其纤芯的平均折射率变化 $\overline{\Delta n_{\text{eff}}}$ 直接影响光纤光栅的耦合系数。

为了实现更高精度的光纤光栅磨损量传感解调，拟选用更短栅区长度的光纤光栅。根据(2)式，短栅区的光纤光栅对应较低的反射率。为此，进行以下仿真，以寻求最佳的栅区长度和折射率调制深度。

所选用的光纤光栅耦合系数 $k$ 为 $0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55 \text{ mm}^{-1}$ ，相应的折射率调制深度 $\Delta n$ 为 $0.74 \times 10^{-4}, 1.23 \times 10^{-4}, 1.72 \times 10^{-4}, 2.22 \times 10^{-4}, 2.71 \times 10^{-4}$ ，光栅周期 $\Lambda = 500 \text{ nm}$ 。根据以上参数，利用(2)式对FBG反射峰峰值功率与栅区长度的关系进行仿真，结果如图2所示。从图2可以看出，栅区长度在 $0\sim 25 \text{ mm}$ ，当耦合系数 $k$ 一定时，FBG反射峰的峰值功率随栅区长度的增加而增大，并逐渐趋于饱和。对于同样栅区长度的FBG，耦合系数 $k$ 较大时，具有较高的反射率。比较几条曲线，在 $0\sim 5 \text{ mm}$ 的栅区长度范围内， $k$ 为 $0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55 \text{ mm}^{-1}$ 时相应的线性度 $R^2$ 为 $0.9079, 0.9556, 0.9901, 0.9862, 0.9679$ ，可以看出， $k=0.35$ 的线性度最佳，适用于光纤光栅的传感解调。图2(b)模拟了 $k=0.35$ ，栅区长度 $L$ 为 $3, 6, 9 \text{ mm}$ 时对应的光纤光栅反射谱。可以看出： $L$ 为 $6 \text{ mm}$ 和 $9 \text{ mm}$ 所对应的的光纤光栅反射谱具有较大的旁瓣，不利于传感解调； $L$ 为 $3 \text{ mm}$ 时旁瓣影响很小，反射率大于 $60\%$ ，适宜作为功率解调的长度。而且，较短栅区长度的光纤光栅也有利于将解调误差控制在较小的范围内。

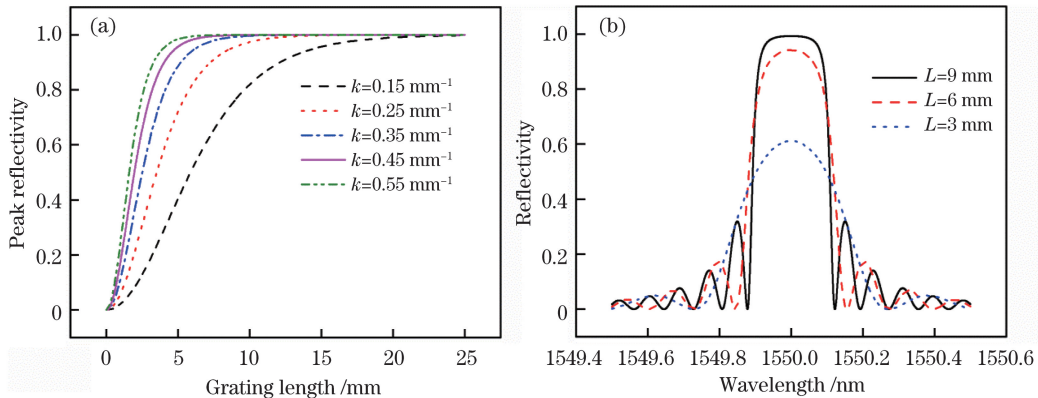


图2 反射率理论仿真。(a)不同耦合系数下的峰值反射率曲线；(b) $k=0.35 \text{ mm}^{-1}$ 时不同栅区长度的反射光谱

Fig. 2 Theoretical simulation of reflectivity. (a) Peak reflectivity curves under different coupling coefficients;

(b) reflectance spectra under different grating lengths when  $k=0.35 \text{ mm}^{-1}$

FBG是一种波长调制型器件。当不考虑外界因素的影响时，它的峰值功率主要由栅区长度和耦合系数决定。对于FBG而言，在耦合系数一定的情况下，可以通过改变栅区的长度，来改变峰值功率。为了保证光纤光栅反射率的一致性，尽量减少其他因素的干扰，选择在一条光纤上刻写多个不同中心波长FBG的方法。依据现有光纤光栅的刻写水平，光纤光栅间的间隔最小可以达到 $1 \text{ mm}$ 。为了提高精度并拓宽量程，选择多条 $3 \text{ mm}$ 短栅区光纤布拉格光栅阵列共同解调的方案。

具体地，对于单个FBG来说，在磨损过程中，根据系统所采用的功率加权寻峰算法，记录或存储此时启用的FBG的初始功率值为 $P_0$ ，传感器的初始反射率记为 $R_0$ 。在磨损过程中，由于FBG的反射率等于反射光功率与入射光功率的比值，且入射光功率是一定的，可相应求得栅区各个位置的实时反射率 $R_x$ 。当 $x=L$ 时，

$$R_L = \frac{P_L}{P_0} \times R_0, \quad (6)$$

式中： $P_L$ 为实时磨损位置的峰值功率。将 $R_L$ 代入

(2)式,即可求得光栅长度  $L$ 。解调磨损量记为  $\Delta L$ ,则每个 FBG 的解调磨损量可表示为

$$\Delta L = 3 - L, 0 \leq L \leq 3. \quad (7)$$

### 2.3 传感解调原理

该系统的核心元件为磨损检测传感器。该传感器拟采用 4 条 SFBGA 作为传感元件,如图 3 所示,分别编号为  $G_1, G_2, G_3, G_4$ 。在每条 SFBGA 中串连 3 个 FBG,FBG 的栅区长度均为 3 mm,FBG 的间隔是 1 mm。

将制作好的传感器接入如图 1 所示的磨损解调系统,则单个 FBG 对应的传感器的解调磨损量为

$$\Delta x_i = i - 1 + \Delta L, \quad (8)$$

式中: $i$  是 FBG 的编号,量纲是 mm。

首先,启用 #1 解调,  $\Delta x = \Delta x_1$ 。当 #1 的  $\Delta x$  达到 1 mm 时,启用 #2 解调,  $\Delta x$  为  $\Delta x_1, \Delta x_2$  的磨损平均值。当 #2 的  $\Delta x$  达到 2 mm 时,启用 #3 解调,  $\Delta x$  为  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  的磨损平均值。

其次,根据设定的阈值,判断信号的有无。当

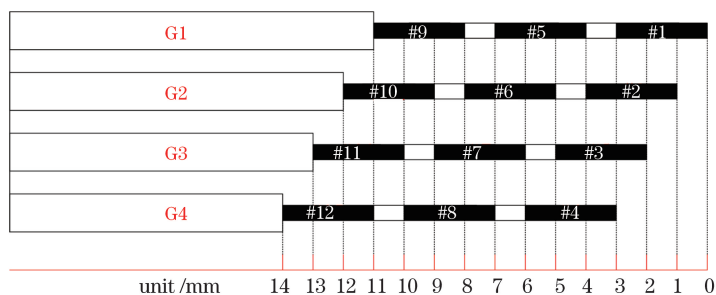


图 3 磨损检测原理图

Fig. 3 Principle diagram of wear detection

### 3 传感器的制作

为了满足该磨损检测传感器在复杂恶劣环境条件下的应用需求,封装材料选用铝材质作为保护。整个传感器的封装过程如图 4 所示。

首先,将 4 根 SFBGA 的栅区位置剥掉涂覆层,穿进长度为 12.5 mm 的陶瓷插芯,保证陶瓷插芯的磨损端和栅区长波长端重合,栅区完全进入陶瓷插芯里,避免栅区粘胶,否则 FBG 会发生啁啾现象。这样在涂覆层已剥除和未剥除位置的交界处就会有一个阶梯,以此作为陶瓷插芯一端的定位位置。然后,使用紫外胶将 SFBGA 与插芯固定。至此,完成了光纤光栅的陶瓷插芯保护封装。接下来,将  $1 \times 4$  的耦合器的 4 个输出端与 SFBGA 的 4 个输入端使用光纤熔接机融合,再将陶瓷插芯尾端的光纤剪断抛光。

#1 无信号时,启用 #4 解调。  $\Delta x$  为  $\Delta x_4, \Delta x_2, \Delta x_3$  的磨损平均值。依此类推,当 # $i$  无信号时,启用 # $(i+3)$  解调。  $\Delta x$  为  $\Delta x_{i+3}, \Delta x_{i+1}, \Delta x_{i+2}$  的磨损平均值。

最后,当 #9 无信号时,  $\Delta x$  为  $\Delta x_{10}, \Delta x_{11}$  的磨损平均值。当 #10 无信号时,  $\Delta x$  为  $\Delta x_{11}$ ;当 #11 无信号时,  $\Delta x$  为  $\Delta x_{12}$ 。

为了防止某个 FBG 的解调磨损量出现不合实际的情况,解调系统会依据算法有选择性地作舍弃处理。为了避免单个 SFBGA 的解调出现较大误差,使用多条 SFBGA 等间隔阶梯分立放置。通过上述算法的综合解调,可提高传感系统的解调精度。该传感器的量程为 14 mm。针对特定的应用领域,可以通过增加 SFBGA 的条数或者增加单条 SFBGA 的 FBG 串连个数来扩展其量程。

可以看出,在每个 FBG 的解调算法中,标定功率  $P_0$  为磨损过程中的实时功率,所以该传感解调算法不受封装和装配过程的功率损失影响。

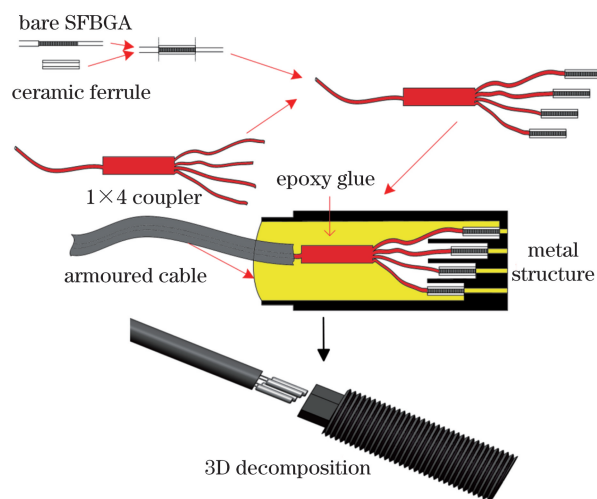


图 4 磨损传感器封装示意图

Fig. 4 Diagram of packaging of wear sensor

将金属结构灌满耐高温、剪切力优良的环氧胶(操作时间为 55 min)。将 4 根 SFBGA 按顺序穿进



金属结构的小孔里,直至陶瓷插芯无法移动;10 min后,将耦合器的输入端穿进铠装光缆里,再将铠装光缆穿进未完全固化的金属件里。至此,光纤的核心封装完成。

将制作好的传感器在常温状态下放置3 d。传感器固化完成后,将其放进温箱里开展24 h高低温应力释放实验。至此,传感器制作完成。

## 4 实验和分析

表1列出了传感器制作所需的4条SFBGA的基本参数。每条SFBGA刻写3个FBG,且FBG的刻写间隔为1 mm,它们的反射率均大于60%,带宽均小于0.3 nm。在光栅刻写过程中,按照图3所示的磨损顺序,从磨损面开始,FBG的中心波长按照从大到小的顺序排布,以避免温差对传感器造成不必要的影响。表1中所列出的波长属于C波段的长波长区域,为更大量程传感器的设计留有空间。

首先,对所选用的SFBGA进行反射率标定实验,以确保其满足理论仿真要求,筛选出合格的SFBGA。结合(3)式进行反射率标定,结果发现,同一批次的FBG反射率差别一般在5%左右。使用的FBG反射率的实测值 $R_0=61\%$ 。

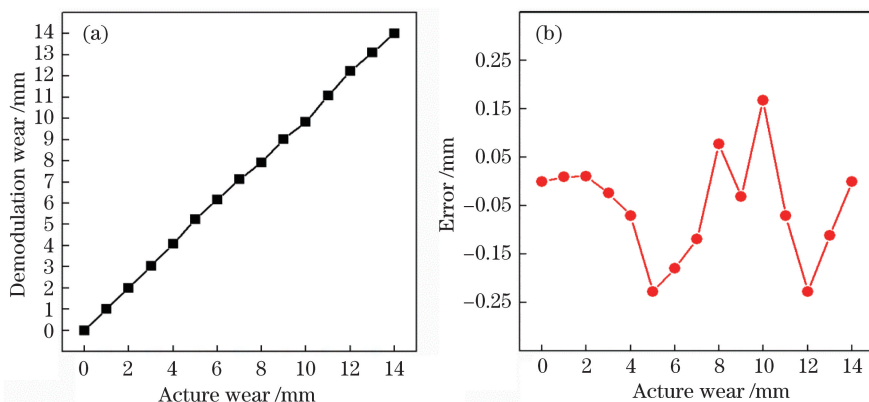


图5 磨损数据图。(a)解调磨损量曲线图;(b)误差分析曲线图

Fig. 5 Wear data diagrams. (a) Demodulation of wear curve; (b) error analysis curve

磨损过程中会出现高温、振动等因素的干扰。为了使整个磨损解调系统正常运转,需克服以下问题:

1) 在持续磨损的过程中,传感器的温度可以达到 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为避免传感线路遭到不必要的损坏,需要把磨损的传感器控制在其所能承受的温度范围内。短时间的高温不会损坏传感器,但是长时间的高温环境会使传感器损坏。实验中,可以使用浸水的方式来降低传感器的温度。

2) 在整个磨损系统中,功率的损耗相当严重。

表1 SFBGA 参数表

Table 1 Parameters for SFBGA

SFBGA number	Center wavelength /nm
$G_1$ (#1, #5, #9)	1565.0, 1559.0, 1553.0
$G_2$ (#2, #6, #10)	1563.5, 1557.5, 1551.5
$G_3$ (#3, #7, #11)	1562.0, 1556.0, 1550.0
$G_4$ (#4, #8, #12)	1560.5, 1554.5, 1548.5

为了验证基于SFBGA的磨损检测传感器的有效性和准确度,使用角磨机作为磨损工具,模拟磨损环境。

为了验证该理论的工程应用前景,简化实验流程,实验中使用游标卡尺作量度,测量并记录每个FBG的峰值功率。当传感器的实际磨损量在0, 1, ..., 13, 14 mm位置时,分别记录每个FBG的峰值功率。根据上文的解调算法计算出每个峰值功率下的理论解调磨损量(图5)。图5中,方块样式的数据点表示上述算法解调出的磨损量,圆点样式的数据点表示实际磨损量和解调磨损量的波动值。从实验结果可以看出,解调磨损量和实际磨损量的误差在 $\pm 0.23\text{ mm}$ 的范围内波动,表明该解调算法在磨损测量中的精度可达1.64%。

一般损耗包括光纤的弯曲,以及转接头和光纤熔接点造成的功率损耗。为尽量避免这些功率损耗对传感解调算法造成干扰,接入系统中的传感器的反射谱峰值应设置在一个合理的功率区间内,比如实验系统所使用的光电探测器的灵敏度可以达到 $-57.5\text{ dBm}$ (系统本身存在噪声,底噪可以达到 $-55\text{ dBm}$ )。为了在3 mm的栅区长度内高精度地解调出磨损量,标定的峰值功率初始值应该大于 $-40\text{ dBm}$ 。也就是说,要充分地考虑各个部件、线路的分配,以及前文提到的一般损耗。具体地,在光源

功率保持一定的情况下,1×2 光纤耦合器应该考虑选择小的插入损耗和相差较大的分光比,以使更多的光进入传感网络部分。

## 5 结 论

提出一种基于 SFBGA 的磨损检测方法,使用 3 mm 的 SFBGA 并将其等间隔阶梯分立布置。在传感器解调环节,提出一种利用 4 条 SFBGA 进行磨损长度解调的算法,较大地减小了磨损解调系统的解调误差。实验结果表明,解调的磨损量和实际磨损量的误差保持在 0.23 mm 以内。该传感器可以用于磨损量的实时监测,实时反映刀具的磨损状况。角磨机打磨实验表明,该检测技术可以应用于复杂环境下各种刀具的磨损检测,如盾构机的刀头磨损检测、钻井 PDC 钻头的磨损检测等。该研究结果为工程应用提供了良好的参考和借鉴。

## 参 考 文 献

- [1] Wang X C, Wang W S, Wu Q. The present situation and prospect of future development of tool wear detection system in China [J]. *Science and Technology Wind*, 2017(26): 12.  
汪晓崇, 王问斯, 吴琴. 国内刀具磨损检测系统的现状及未来发展方向展望[J]. *科技风*, 2017(26): 12.
- [2] Kishida M. Optical fiber contact wire wear detection system[J]. Peng H M, Transl. *Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology*, 2006(2): 43-45.  
岸田光央. 采用光纤的接触导线磨损检测系统[J]. 彭惠民, 译. *国外机车车辆工艺*, 2006(2): 43-45.
- [3] Cook N H, Subramanian K. Micro-isotope tool wear sensor[J]. *Annals of the CIRP*, 1978, 21(1): 67-72.
- [4] Kassim A A, Mannan M A, Jing M. Machine tool condition monitoring using workpiece surface texture analysis[J]. *Machine Vision and Applications*, 2000, 11(5): 257-263.
- [5] Xiong S C. Research on cutting tool wear condition monitoring based on computer vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.  
熊四昌. 基于计算机视觉的刀具磨损状态监测技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [6] Anandakrishnan V, Mahamani A. Investigations of flank wear, cutting force, and surface roughness in the machining of Al-6061-TiB<sub>2</sub> *in situ* metal matrix composites produced by flux-assisted synthesis [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 55: 65-73.
- [7] Shi J, Ding N. On-line detection of the state of grinding wheel wear based on acoustic emission technique [J]. *Journal of Changchun University*, 2013, 23(8): 931-936, 950.  
石建, 丁宁. 基于声发射技术的砂轮磨损状况在线检测[J]. *长春大学学报*, 2013, 23(8): 931-936, 950.
- [8] Venkata Rao K, Murthy B S N, Mohan Rao N. Prediction of cutting tool wear, surface roughness and vibration of work piece in boring of AISI 316 steel with artificial neural network[J]. *Measurement*, 2014, 51: 63-70.
- [9] Cheng G. Research on cutting temperature and tool wear of Cr12MoV die steel in high-speed milling[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.  
程格. 高速铣削模具钢 Cr12MoV 的切削温度及刀具磨损研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [10] Li K, Huang M, Wu G X, *et al.* Design and implementation of tool wear condition monitoring system based on inverter input current[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2017(6): 90-92, 96.  
李康, 黄民, 吴国新, 等. 基于变频器输入电流的刀具磨损状态监测系统设计与实现[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2017(6): 90-92, 96.
- [11] Yang F, Li Y. Research on tool wear prediction based on Fitnet neural network[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2018, 46(14): 50-51, 49.  
杨丰, 李云. 基于 Fitnet 的刀具磨损量预测方法研究[J]. *机床与液压*, 2018, 46(14): 50-51, 49.
- [12] Xiao Z Y, Zhang W M, Liu Z H. Detection technology of tool wear based on maximum entropy and cross entropy theory [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2018, 46(22): 89-93.  
肖忠跃, 张为民, 刘朝晖. 基于最大熵与交叉熵理论的刀具磨损检测技术[J]. *机床与液压*, 2018, 46(22): 89-93.
- [13] Shang W, Wang B Q. Research on the ultrasonic testing technology of shield tool wear based on wireless communication[J]. *Construction Mechanization*, 2018, 39(1): 56-59.  
尚伟, 王百泉. 盾构刀具磨损超声波检测技术研究[J]. *建筑机械化*, 2018, 39(1): 56-59.
- [14] Cao W Q, Fu P, Li X H. The diagnosis of tool wear based on EMD and GA-B-spline network[J]. *Sensors & Transducers*, 2013, 156(9): 195-202.
- [15] Geramifard O, Xu J X, Zhou J H, *et al.* Multimodal hidden Markov model-based approach for tool wear monitoring[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(6): 2900-2911.
- [16] Guo Y X, Xiong L, Kong J Y, *et al.* Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 50-58.  
郭永兴, 熊丽, 孔建益, 等. 滑动式光纤布拉格光栅

- 位移传感器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 50-58.
- [17] 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.
- [18] Zhu Y S, Gui L, Zhu Y X. Temperature sensing for wavelength demodulation based on recognition by maximum intensity of radio frequency[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0728003.  
朱雨霜, 桂林, 朱玉绚. 基于最大射频强度判别法的温度传感波长解调研究[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0728003.
- [19] Gu Z T, Ling Q. Theoretical analysis for long-period fiber grating strain sensor based on dual-peak resonance near PMTP[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0106005.  
顾铮先, 凌强. 基于近 PMTP 区域双峰谐振效应的长周期光纤光栅应变传感理论分析[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0106005.
- [20] Wang G D, Yang Y L. Two kinds of tension in fiber Bragg gratings with cladding etched as the sinusoidal function[J]. Optoelectronics letters, 2010, 6(1): 48-50.
- [21] Sun X M, Sun H Y, Yan X S. Application of FBG sensor to internal displacement monitoring of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3847-3851.  
孙新民, 孙红月, 严细水. FBG 传感器在量测围岩内部位移中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3847-3851.
- [22] Liu B, Niu W C, Yang Y F, *et al.* A novel fiber Bragg grating accelerometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(1): 42-44.  
刘波, 牛文成, 杨亦飞, 等. 新型光纤光栅加速度传感器的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(1): 42-44.
- [23] Kashyap R. Fiber Bragg gratings [M]. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2010: 130-142.
- [24] Ou J P, Zhou Z, Wu Z J, *et al.* Intelligent monitoring of Heilongjiang Hulan river bridge based on FBGs[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(1): 45-49, 64.  
欧进萍, 周智, 武湛君, 等. 黑龙江呼兰河大桥的光纤光栅智能监测技术[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 45-49, 64.
- [25] Li C. Fiber grating: principle, technology and sensing applications[M]. Beijing: Science Press, 2005: 87-88.  
李川. 光纤光栅: 原理、技术与传感应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 87-88.