

文章编号 1004-924X(2019)07-1458-07

## 耐高温增量式光电编码器的研制

韩庆阳\*, 陈 赟, 张红胜, 高胜英, 张 晰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为了在高温环境下测量角位移,研制了一种基于光纤的耐高温增量式光电编码器。针对高温工作环境提出利用耐高温的光纤传输光,在常温环境中采用 FPGA 处理增量式编码器的电信号,并通过 USB 传输角度信息;分析光源光束准直度对光电编码器的影响,提出采用 LED 凸透镜光纤耦合的方式获得平行光;最后,使用自准直平行光管和 23 面体检测精度,并对比 LED 凸透镜耦合方式和直接耦合方式的精度。实验结果表明:该系统在 100 °C 的高温环境下工作正常,编码器头部外型尺寸为 62 mm×42 mm,分辨力为 0.3",精度  $3\sigma=13.55''$ ;与 LED 直接耦合方式相比精度提高了 20.8%,满足高温环境下角位移测量的需求。

**关键词:**光电编码器;光纤;耐高温;LED 凸透镜光纤耦合;增量式;FPGA+USB

**中图分类号:**TP212.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192707.1458

## Development of high-temperature resistant incremental encoder

HAN Qing-yang\*, CHEN Yun, ZHANG Hong-sheng, GAO Sheng-ying, ZHANG Xi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: lanbohesky@126.com

**Abstract:** To measure the angle shift that occurs under high-temperature conditions, a fiber-based high-temperature-resistant incremental encoder was developed in this study. First, a high-temperature-resistant fiber was employed to transfer light under high-temperature conditions. A field programmable gate array was used to process the incremental encoder's electric signal, and a USB was used to transfer the angle in a normal temperature environment. Second, the effect of the collimation degree of a light beam on the performance of the optical encoder was analyzed, and then a light-emitting diode (LED) convex lens fiber couple was developed. Finally, 23 surface polyhedrons and auto-collimations were used to test the accuracy, and the accuracies of the LED convex lens fiber couple and fiber direct couple were compared. The results show that this system can work normally in 100 °C conditions. The size of the encoder head is 62 mm×42 mm, the resolution is 0.3", and the precision  $3\sigma$  is 13.55", which represent an improvement of 20.8% over that of the fiber direct couple. The system thus satisfies high-temperature conditions.

**Key words:** photoelectronic encoder; fiber; high-temperature resistant; LED convex lens fiber couple; incremental; FPGA+USB

收稿日期:2018-12-14;修订日期:2019-02-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51605465);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20180520184JH)

## 1 引言

光电编码器是一种角度测量装置,它将空间角度信息转换成数字信息<sup>[1-6]</sup>。但目前的光电编码器大都在常温下工作,为了给石油钻采、煤矿开采以及轨道交通等在高温环境工作的设备提供角度信息,亟需研制耐高温的光电编码器。然而,光电编码器的电子元器件在高温环境下暗电流和热噪声增大,元件可靠性降低,甚至失效。因此,提出利用光纤传输光源(即:红外发光二极管)发出的光和探测器(即:光电二极管)接收的光,在常温环境中处理电信号。朱孝立和卢新然等人从理论和仿真实验的角度验证了光源准直性对光电编码器精度的影响,但并未给出解决方案<sup>[7-8]</sup>。

为了减小光源辐射角对光电编码器精度的影响,本文提出采用LED凸透镜光纤耦合的方式获得平行光。与传统的LED光纤直接耦合方式相比,该方式耦合效率高,光源准直,编码器精度随之提高。增量式光电编码器具有编码方式简单,工作稳定可靠,响应速度快等优点<sup>[9]</sup>,故采用增量式编码的方式。采用Xilinx公司的Spartan6系列FPGA处理探测得到的电信号,最后,通过USB将角度信息发送给主系统。

经测量,本编码器的头部外型尺寸为62 mm×42 mm,在100℃的环境中,分辨力为0.3",精度为 $3\sigma=13.55''$ ,满足该系统要求。

## 2 光源光束准直度对光电编码器信号的影响

光电编码器的测角机理是:光电码盘和狭缝之间的相对运动产生莫尔条纹,通过莫尔条纹实现角度测量<sup>[8-9]</sup>。对于平行光入射的莫尔条纹光场光栅函数的表达式为:

$$y(x) = \begin{cases} 1, & -\frac{b}{2} \leq x \leq \frac{b}{2}, \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $b$ 为光栅中透光区域的宽度。对式(1)进行傅里叶变换,得到:

$$Y(x) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(iax), \quad (2)$$

其中 $a_0 \sim a_i$ 分别为各次余弦分量的系数。计算公式如下:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{p} \int_{-\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} f(x) dx = \frac{b}{p} \\ \dots \\ a_i = \frac{1}{p} \int_{-\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} f(x) \cos(iax) dx = \frac{2b}{p} \sin\left(c \times \frac{nb}{p}\right) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $p$ 为光栅周期。将 $a_0$ 和 $a_i$ 代入式(2)中,可以得到光栅透过特性的函数表达式:

$$Y(x) = \frac{b}{p} + \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \frac{2b}{p} \sin\left(c \times \frac{n\omega b}{p}\right), \quad (4)$$

其中 $\omega = \frac{2\pi}{p}$ ,称为基频。从式(4)可以看出:平行

光源入射时,光栅函数是由常数 $\frac{b}{p}$ 和多次正弦谐波组成的。

当编码器光源和接收元件与光轴有一定角度时,会影响莫尔条纹的相位和光强。接收元件的光电流和光通量成正比,所以发散角越大,光通量越小,光电流随之减小,导致莫尔条纹变形或者漂移。且码盘的线条越细,刻线密度越高,该现象越明显。

## 3 系统设计

如图1所示:码盘和光栅盘组成的前端探头部分放在100℃的高温环境中,LED光源发出的光经过凸透镜得到准直性良好的平行光,利用光纤的全反射和耐高温性能实现光信号在高温环境和常温环境之间的传输。将LED光源和接收器电路以及信号处理电路等放在常温环境中,避免因高温引起的电子元器件失效。

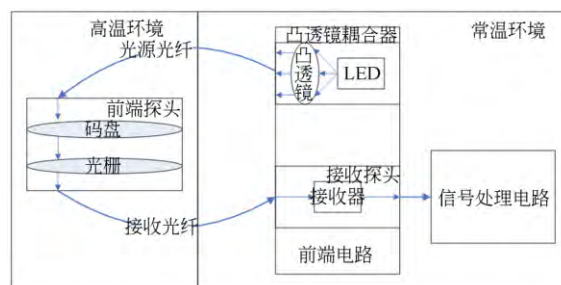


图1 光电编码器系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of photoelectronic encoder system

### 3.1 LED凸透镜光纤耦合及耐高温设计

光纤具有优越的耐高温性,二氧化硅光纤一

般可耐 1 500 °C 高温。选用光纤作为光信号的传输媒介,满足本编码器 100 °C 环境中工作的要求。LED 光线入射到光纤束,当满足全反射条件,即:入射角不大于光纤束的数值孔径角,即可实现全光传输<sup>[10-12]</sup>。凸透镜耦合器对 LED 光束进行较好的聚光,使光纤入射光纤角度小于数值孔径角,得到均匀分布、准直性好的光线。LED 凸透镜耦合器原理图如图 2 所示。分别测量 LED 直接耦合与 LED 凸透镜耦合光电编码器产生的正弦信号,结果如图 3 所示。

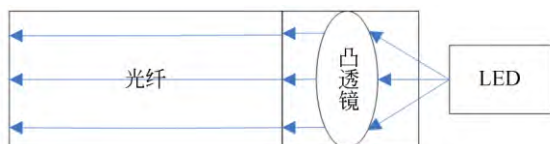
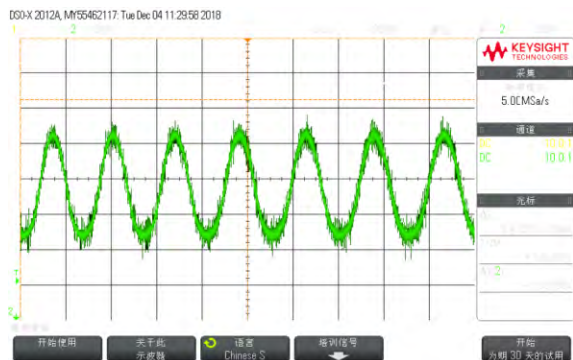


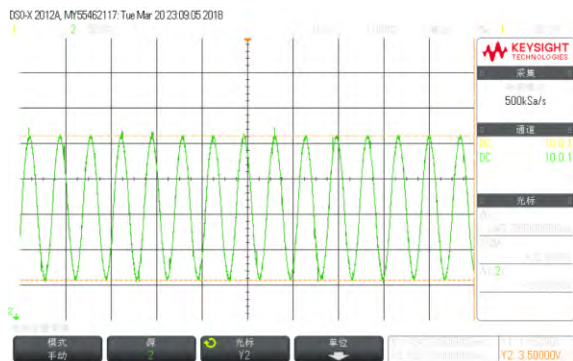
图 2 LED 凸透镜耦合器原理

Fig. 2 Principle of LED convex lens coupler



(a) LED 直接耦合信号波形

(a) Direct couple's waveform



(b) LED 凸透镜耦合信号波形

(b) Convex lens couple's waveform

图 3 不同耦合方式得到的正弦信号

Fig. 3 Sine signals output from encoder with different couplers

由图 3 可知:LED 凸透镜耦合得到的正弦信号的对比度明显优于 LED 直接耦合光源得到的信号对比度。低的信号对比度会影响细分精度,从而影响总体精度。

### 3.2 增量式编码器信号处理方法

#### 3.2.1 信号处理系统及工作原理

前端探头测量得到的正余弦信号经放大整形送给 FPGA,同时由 12 位模数转换后给 FPGA;零位信号则只需放大整形后送入 FPGA。FPGA 对信号进行处理后,经由 USB 传送出去。硬件原理框图如图 4 所示。



图 4 光电编码器信号处理电路

Fig. 4 Signal processing system of optical encoder

FPGA 进行粗码计数和精码细分等运算,得到数字角度信息。软件处理流程如图 5 所示。

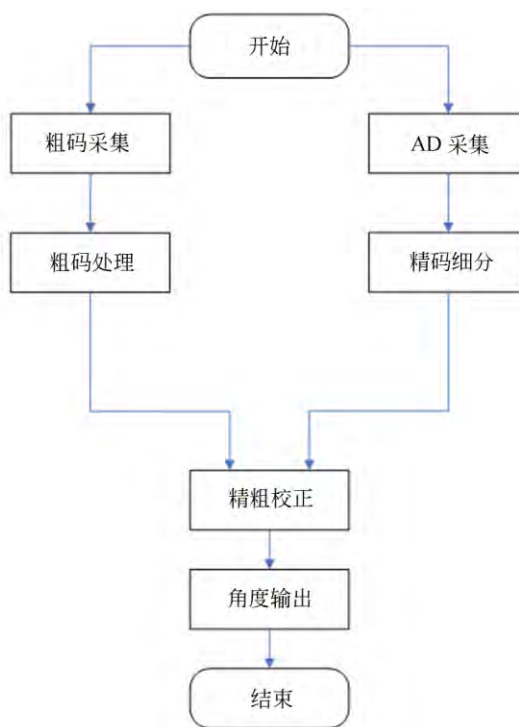


图 5 FPGA 信号处理软件流程

Fig. 5 Flow chart of signal process of FPGA software

### 3.2.2 细分处理方法

在计量光栅和机械制造装调精度确定的情况下,对精码细分运算能够获得更高的分辨力及精度。因此,要对精码信号进行处理,以保证其质量,提高细分精度和分辨力。本设计中计量光栅的原始刻线为 4 096,分辨力为 10 位,想达到 22 位即  $0.3''$  的分辨力,需要细分 10 位。由前端探头得到 4 个相位的精码,其表达式为:

$$\begin{cases} u_0 = C_0 + A_0 \sin \theta \\ u_{90} = C_{90} + A_{90} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ u_{180} = C_{180} + A_{180} \sin(\theta + \pi) \\ u_{270} = C_{270} + A_{270} \sin\left(\theta + \frac{3\pi}{2}\right) \end{cases}, \quad (5)$$

其中: $C_0, C_{90}, C_{180}, C_{270}$  是 4 路信号的直流偏移量, $A_0, A_{90}, A_{180}, A_{270}$  是 4 路信号的幅值。选用 LM158 差分放大器对精码 SIN(COS 与其处理方法一致)进行处理,将处理后的信号送入 AD,FP-GA 通过 AD 获得精码信号后进行细分,软件流程如图 6 所示。

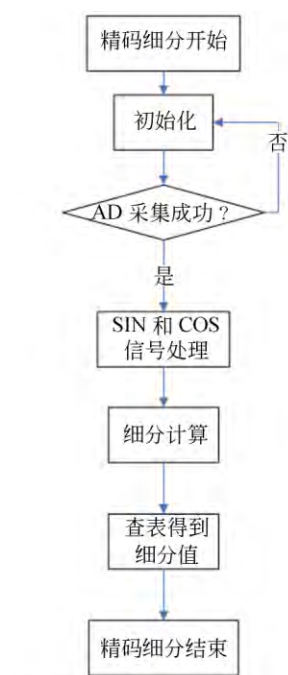


图 6 精码处理流程

Fig. 6 Flow chart of precise code processing

## 4 精度分析检测及讨论

### 4.1 精度分析

光电编码器的误差由码盘制造误差、轴系晃动及码盘偏心误差、细分误差、量化误差和检测误差组成。其中,码盘制造误差、轴系晃动及码盘偏心误差和细分误差是编码器误差的主要组成部分,被称作光电编码器的三大误差。

#### 4.1.1 码盘制造误差

码盘是由码盘刻划机在镀有金属铬的玻璃上刻划制造出来的,码盘刻划时的分度误差和刻划机的轴系误差等引起的误差统称为码盘制造误差。在置信系数  $t_1 = \sqrt{3}$  时,本编码器的码盘误差  $\partial_1 = 40''$ 。

#### 4.1.2 轴系晃动及码盘偏心误差

编码器轴系径向晃动和码盘安装偏心最高可达  $1 \mu\text{m}$ ,码盘精码道的刻划半径为  $R = 25 \text{ mm}$ ,则最大的角误差为: $\partial_2 = \arcsin\left(\frac{e}{R}\right) = 8.25''$ ,置信系数为: $t_2 = \sqrt{3}$ 。

#### 4.1.3 细分误差

细分误差是指一个光栅栅距内各细分点位置偏离标准位置的偏差,光电编码器中的光、机、电所有零件的误差及性能变化、环境条件等都对它有影响,因此是一种综合误差。本编码器的细分误差最大为: $\partial_3 = 40''$ ,由多项误差合成,置信系数为: $t_3 = \sqrt{3}$ 。

#### 4.1.4 量化误差

把一个联系的圆周变量转换成  $2^n$  个不连续的角度值,由这个模拟数值构成的误差即为量化误差。

22 位光电编码器的分辨力为  $\xi = \frac{360^\circ}{2^{22}} = 0.309''$ ,则最大量化误差为: $\partial_4 = \frac{\pm \xi}{2} = \frac{360^\circ}{2^{23}} = \pm 0.154''$ ,置信系数  $t_4 = \sqrt{3}$ 。

#### 4.1.5 检测误差

检验误差是由检验设备安装及检验装置本身的误差引起的。本系统采用自准直光管和 23 面体检测精度,通过连接工装与 23 面体同轴连接,

自准直光管本身的精度为  $0.1''$ 。此项误差最大为  $\partial_5 = 1''$ , 置信系数为:  $t_5 = \sqrt{3}$ 。

4.1.6 合成误差

编码器的最终误差是上述 5 种误差的合成, 本编码器的最大合成误差为:  $\partial_{\text{total}} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \frac{\partial_i^2}{t_i^2}} = 26.39''$ 。

4.2 精度检测

将前端探头放在温度为  $100\text{ }^\circ\text{C}$  的恒温箱中, 处理电路及光源和接收电路位于常温环境中, 采用自准直光管和 23 面体检测增量式光电编码器的精度, 23 面体与探头通过检验工装连接。23 面体相邻两个面与分别自准直光管垂直时编码器转过的角度为  $\frac{360^\circ}{23}$ 。首先, 调整编码器使其角度显示为 0, 此时再调整自准直光管的光轴与 23 面体的第一面垂直, 即自准直光管的读数为零, 当与第  $i$  ( $1 \leq i \leq 23$ ) 面垂直时, 理论上转过的角度为:

$$\theta = (i - 1) \times \left(\frac{360^\circ}{23}\right). \tag{6}$$

此时光电编码器显示的读数  $\theta'$  与  $\theta$  之差即为此位置处的误差。但是在实际测量中, 编码器的转动比较容易操作, 故将编码器转到  $(i-1) \times \left(\frac{360^\circ}{23}\right)$  位置处, 此时自准直光管的误差即为编码器在此处的误差。最终误差还要将编码器的分辨率误差和 23 面体的修正误差考虑进去。

4.3 结果与讨论

采用上述检测系统分别检测 LED 直接耦合与 LED 凸透镜耦合方式的精度, 如表 1 所示。

由表 1 可知, LED 直接耦合编码器: 误差最大值为  $4.4''$ , 最小为  $-14.9''$ , 峰峰值为  $19.3''$ , 均方差为  $16.37''$ ; LED 凸透镜耦合编码器: 误差最大值为  $4.8''$ , 最小为  $-9.8''$ , 峰峰值为  $14.6''$ , 均方差为  $13.55''$ ; LED 凸透镜耦合编码器精度比直接耦合提高了  $20.8\%$ , 可见该方法有效地减小了因光源发散给编码器带来的误差。

本编码器由于机械尺寸等因素的限制, 探头

未增加对径设计; 如果增加对径, 精度会更高。  
对径设计即在码盘的对径位置增加光源和探测器, 两组探测器得到的信号进行解码处理, 最后取二者均值。对径设计能够减少因装调引起的偏心误差, 从而提高精度。

表 1 LED 直接耦合和 LED 凸透镜耦合精度检测结果  
Tab. 1 Results of LED fiber direct couple and LED convex lens couple

| 测量位置 | LED 凸透镜耦合<br>编码器精度/ $('' )$ | LED 直接耦合<br>编码器精度/ $('' )$ |
|------|-----------------------------|----------------------------|
| 1    | 0                           | 0                          |
| 2    | -0.8                        | -1.4                       |
| 3    | -3.2                        | -5.1                       |
| 4    | -5.2                        | -7.5                       |
| 5    | -5.5                        | -7.6                       |
| 6    | -7.6                        | -6.9                       |
| 7    | -7.7                        | -3.3                       |
| 8    | -8.5                        | -0.6                       |
| 9    | -8.9                        | -1.7                       |
| 10   | -8.3                        | 1.1                        |
| 11   | -3.6                        | 2.0                        |
| 12   | -1.7                        | 4.4                        |
| 13   | 2.5                         | -0.1                       |
| 14   | 4.5                         | -3.2                       |
| 15   | 4.8                         | -11.6                      |
| 16   | 4.0                         | -13.8                      |
| 17   | -1.6                        | -14.9                      |
| 18   | -6.3                        | -13.5                      |
| 19   | -9.8                        | -10                        |
| 20   | -8.5                        | -5.9                       |
| 21   | -8.4                        | -2.2                       |
| 22   | -2.0                        | 1.5                        |
| 23   | -0.6                        | -0.6                       |

## 5 结 论

本文研制了耐高温增量式光电编码器,提出使用耐高温光纤作为光信号传输的媒介,采用LED凸透镜光纤耦合的方式减小由光源准直性引进的误差。实验结果表明:该系统在100℃的高温环境下工作正常,编码器头部尺寸为

62 mm×42 mm,分辨力为0.3",精度 $3\sigma = 13.55''$ ;相比直接耦合方式,精度提高了20.8%。实际应用表明:该系统满足在100℃高温环境下精度 $3\sigma \leq 20''$ ,分辨力高于1.5"的要求。

该耐高温编码器已经在某舰动力控制系统舱中得到工程应用。对于石油、煤炭地下开采等高温环境的光电编码器的研制具有借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] 叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.  
YE SH X. *Accurate Measurement about Photoelectric Shift*[M]. Chengdu: Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 韩旭东, 徐新行, 刘长顺, 等. 用于星载激光通信终端的绝对式光电角度编码器[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2424-2431.  
HAN X D, XU X H, LIU CH SH, *et al.*. Absolute optical angle encoder used for laser communication terminal on satellite platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2424-2431. (in Chinese)
- [3] 刘长顺, 王显军, 韩旭东, 等. 八矩阵超小型绝对式光电编码器[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 326-333.  
LIU CH SH, WANG X J, HAN X D, *et al.*. Ultra miniature absolute optical encoders based on eight-matrix coding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 326-333. (in Chinese)
- [4] 杨守旺, 梁立辉, 王树洁. 高速高可靠性光电轴角编码器设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9): 113-116.  
YANG SH W, LIANG L H, WANG S J. Photoelectrical encoder IP core design [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(9): 113-116. (in Chinese)
- [5] 孙莹, 万秋华, 王树洁, 等. 航天级光电编码器的信号处理系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1182-1188.  
SUN Y, WAN Q H, WANG S J, *et al.*. Design of signal process system for spaceborne photoelectric encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1182-1188. (in Chinese)
- [6] 赵长海, 万秋华, 梁立辉, 等. 小型高精度航天级光电编码器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1224-1230.  
ZHAO CH H, WAN Q H, LIANG L H, *et al.*. The small high-precision spaceborne photoelectric encoder[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2015, 29(8): 1224-1230. (in Chinese)
- [7] 朱孝立, 陈军宁. 光电编码器LED光源的准直[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 750-756.  
ZHU X L, CHEN J N. Beam collimation of LED in optical encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 750-756. (in Chinese)
- [8] 卢新然, 宋路, 万秋华. 红外光源参数对光电编码器信号的影响[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 232-237.  
LU X R, SONG L, WAN Q H. Effect of infrared light source parameters on photoelectric encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 232-237. (in Chinese)
- [9] 杜颖财, 王希军, 王树洁, 等. 增量式编码器自动检测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(11): 993-998.  
DU Y C, WANG X J, WANG SH J, *et al.*. Auto-detection system of incremental encoder[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(11): 993-998. (in Chinese)
- [10] 赖丽萍, 王文法, 庄其仁. LED菲涅耳透镜光纤束耦合器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 022201.  
LAI L P, WANG W F, ZHUANG Q R. Design of LED Fresnel lens fiber bundle coupler[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 022201. (in Chinese)
- [11] 张晓婷, 刘楚嘉, 漆宇, 等. 基于LED光源与聚合物光纤束的能量均匀透镜耦合器设计[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 94-102.  
ZHANG X T, LIU CH J, QI Y, *et al.*. Design of lens coupler with uniform energy distribution based

- on LED source and polymer optical fiber bundle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 94-102. (in Chinese)
- [12] 王子仪, 张荣君, 徐蔚, 等. 基于全反射的发光二极管-照明光纤耦合器的设计与研制[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 265-269.
- WANG Z Y, ZHANG R J, XU W, *et al.*. A light emitting diode-lighting fiber coupler based on total reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 265-269. (in Chinese)

作者简介:



韩庆阳(1988—),男,黑龙江哈尔滨人,助理研究员,2013 年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事光电角位移精密测量和信号处理方面的研究。  
E-mail: lanbohesky@126.com



陈 赟(1976—),男,山东菏泽人,副研究员,2006 年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事精密机械设计方面的研究。