

# 激光陀螺抗辐照读出系统方案研究

李 龙 丁小昆 陈林峰 韩宗虎 严吉中

中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

**摘要** 为了提高环形激光陀螺(RLG)的空间环境适应性,提出了基于菲涅耳透镜的RLG抗辐照读出方案。该方案采用菲涅耳透镜对RLG输出的顺/逆时针光进行会聚,在其焦平面前方得到了条纹数不变、尺寸显著减小的干涉条纹。相比于采用普通凸透镜,基于菲涅耳透镜的读出系统在球差校正和安装便利性等方面更具优势。计算结果表明,该方案能将RLG输出光斑尺寸降低到原水平的1%以下,显著降低了对光电管的尺寸要求,从而大幅减小了辐照对探测器的损伤,提高了RLG的空间环境适应性。

**关键词** 激光光学; 激光陀螺; 抗辐照; 菲涅耳透镜; 读出系统

中图分类号 V241.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0202006

## Research on a Method of Radiation-Resistant RLG Readout System

Li Long Ding Xiaokun Chen Linfeng Han Zonghu Yan Jizhong

*Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China,  
Xi'an, Shaanxi 710065, China*

**Abstract** In order to improve the adaptability of ring laser gyro (RLG) in the outer space environment, a method about RLG output system based on Fresnel lens is proposed. After being converged by the Fresnel lens, the RLG's clockwise and anticlockwise beams forge a new array of fringe patterns in front of the focal plane, where the number of patterns does not change, but the size is significantly reduced. Compared with the ordinary convex lens, the Fresnel lens based RLG readout system may bring up advantages in the spherical aberration calibration and installing convenience. It is validated that compared with the traditional RLG readout system, this system can decrease the size of the beam spot down to less than 1%, enabling a smaller photodiode to be selected, and the radiation damage is significantly reduced, therefore the RLG's adaptability of RLG in the outer space environment is improved.

**Key words** laser optics; RLG; radiation-resistant; Fresnel lens; readout system

**OCIS codes** 140.3295; 140.3370; 220.3620; 260.3160

## 1 引 言

环形激光陀螺(RLG)作为一种中高精度定位的角速度传感器,由于其成本低、稳定性好、可靠性高等优点,目前在航空领域已取得了广泛的应用。美国的Northrop-Grumman公司生产的零闭锁激光陀螺(ZLG)号称第二代RLG。该公司通过对ZLG采用一系列设计改进和特殊工艺,目前已将应用范围拓展到外太空领域<sup>[1-2]</sup>。

由于Sagnac效应,当RLG相对惯性空间转动时,其顺、逆时针光形成的干涉条纹将发生定向移动。光电管用于将这种定向移动转化为电信号,经后端电路处理提取转速信号,是RLG读出系统的主要元件。目前光电管使用的光敏元件属于晶体结构,在空间辐照下其性能将发生急剧下降,并且尺寸越大,该效应对性能的影响就越大。这将直接导致处于空间环境中的RLG发生读出系统失效<sup>[3]</sup>。因此,若能缩小RLG使用的光电管尺寸,同时不能影响陀螺解调,便能起到降低辐照影响的效果。

收稿日期: 2014-07-24; 收到修改稿日期: 2014-09-15

作者简介: 李 龙(1984—),男,硕士,工程师,主要从事激光陀螺设计方面的研究。E-mail: 10548265@qq.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

目前,RLG使用的光电管尺寸主要受光斑尺寸约束,为了不影响陀螺解调,在减小光电管尺寸之前,需要设法减小RLG输出光斑的尺寸。1991年,Bergstrom等<sup>[4]</sup>曾提出一种利用球面镜反射减小光斑尺寸的读出系统方案<sup>[4]</sup>。然而,该方案虽然能够减小光斑尺寸,但也会带来较大的球差,令干涉条纹对比度受到极大影响,因此可行性不高。基于菲涅耳透镜的RLG抗辐照解调方案,在有效减小RLG干涉条纹光斑尺寸,提高整体抗辐照性能的同时,还能极大地避免球差,可行性更高。

## 2 空间辐照对光电管性能的影响机理及应对方案

空间辐照对光电管性能的影响包括两方面:一方面,在 高能辐照作用下,强大的外界电场能量将瞬间令几乎所有的载流子达到饱和,称之为“抽运效应”;另一方面,在辐照过程中,高能粒子对光敏面晶体结构产生了冲击,导致晶格发生移位产生色心缺陷。这种色心缺陷会俘获携带着转速信息的载流子,令光电管的暗电流增大,严重时甚至无法产生光电流,这种影响通常被称为“延迟效应”。抽运效应发生时,光电管接收到的光强信号将接近饱和,令陀螺无法敏感外界转速信号。延迟效应则使得光电管暗电流显著增大,导致光电管对明暗条纹的辨别能力降低,产生RLG误计数。上述两种效应的影响均与其光敏面尺寸有关,光电管尺寸越小,对其性能的影响就越小。另外,通过选用合适的抗辐照钝化层以及对器件进行辐照老化处理,也可提高其抗辐照能力<sup>[5]</sup>。另外,选用抗辐照性能更强的a-Si:H型非晶硅结构的薄膜型光电管替代目前使用的晶体结构光电管也是一种解决方案。为了进一步提升激光陀螺的抗辐照能力,可考虑采用该产品完成光电管的更新换代<sup>[6-7]</sup>。

综上所述,降低辐照对RLG读出系统的影响的主要方法有两个:1)设法减小陀螺输出光斑,选用体积更小的光电管;2)开展抗辐照能力更强的a-Si:H型非晶硅薄膜光电管研究,并对目前使用的晶体型光电管进行替代。

## 3 RLG抗辐照解调原理及方案

### 3.1 RLG解调原理

如图1所示,在RLG谐振腔内运行着的顺、逆时针光,经其拍频输出镜透射出光。两束光经过不同的光路发生折射、反射,在棱镜内部发生干涉,并在两者的光斑重合区域形成干涉条纹。当RLG相对惯性空间发生转动时,干涉条纹将发生定向移动。条纹移动的速度与外界转速成正比,方向与转动的方向相关。因此,通过光电管测出将干涉条纹移动的频率和方向,并将其转化为相应的电信号,便可获得外界转速信息。由于顺、逆时针光夹角很小(角秒量级),可近似认为光电管接收到的干涉条纹光斑与陀螺谐振腔产生的激光光斑等大,干涉条纹间距为<sup>[8-9]</sup>

$$\Delta x = \lambda / 2\theta, \tag{1}$$

式中 $\Delta x$ 为条纹间距, $\lambda$ 为谐振腔输出激光波长, $2\theta$ 为顺、逆时针光从合光棱镜出射时的夹角。

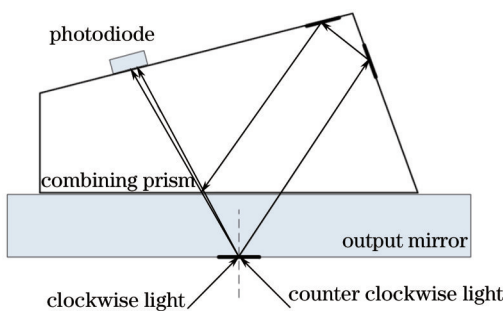


图1 RLG合光系统示意图

Fig.1 Combining system of a RLG

### 3.2 RLG抗辐照解调原理

RLG抗辐照解调的原理:经透镜会聚的办法,减小陀螺输出光斑尺寸并选用尺寸更小的光电管,从而降低辐照对整体读出系统性能的影响。

如图2所示,透镜左侧光线代表合光棱镜输出的顺、逆时针光光斑边缘的光线, $2\theta$ 为顺、逆时针光出射夹

角。现认为透镜为理想成像元件,因此顺、逆时针光束将分别会聚于点  $A$ 、 $B$ 。经透镜折射后,顺、逆时针光将由平面波变为会聚球面波,并在图中的阴影区域发生干涉。根据光的可逆性原理,可以将该干涉现象看作是理想点光源  $A$ 、 $B$  发出的发散球面波的干涉。若将光电管光敏面置于透镜焦点前方  $C$  处,则  $A$ 、 $B$  产生的球面波在  $C$  点的复振幅  $E_1$ 、 $E_2$  分别为

$$\begin{cases} E_1 = \frac{E_{10}}{|AC|} \exp[j(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{AC} - 2\pi\nu_1 t + \phi_{10})] \\ E_2 = \frac{E_{20}}{|BC|} \exp[j(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{BC} - 2\pi\nu_2 t + \phi_{20})] \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $E_{10}$ 、 $E_{20}$  分别为点光源  $A$ 、 $B$  的电场强度;  $\phi_{10}$ 、 $\phi_{20}$  分别是两点光源出射时的初始相位;  $\mathbf{k}_1$ 、 $\mathbf{k}_2$  分别为两点光源的波矢,二者对应的波数近似相等,均为  $k_0$ ;  $\nu_1$ 、 $\nu_2$  分别为两点光源的频率,也近似相等,均为  $\nu$ 。由于顺、逆时针光夹角  $2\theta$  仅为角秒量级,  $A$ 、 $B$  两点的距离非常小,  $C$  点相对  $A$ 、 $B$  足够远,因此对(2)式中采用标量波近似讨论。 $t$ 时刻  $C$  点的干涉场强度为

$$I(C) = \left(\frac{E_{10}}{|AC|}\right)^2 + \left(\frac{E_{20}}{|BC|}\right)^2 + 2\left(\frac{E_{10}}{|AC|}\right)\left(\frac{E_{20}}{|BC|}\right)\cos[k_0(|AC| - |BC|) + (\phi_{20} - \phi_{10})]. \quad (3)$$

相位差可以表示为

$$\Delta = |AC| - |BC| = \sqrt{(x + |AF'|)^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{(x - |BF'|)^2 + y^2 + z^2}. \quad (4)$$

设光电管光敏面置于距离透镜焦点前方  $z_0$  处,得到

$$\Delta \approx z_0 \left[ 1 + \frac{(x + |AF'|)^2 + y^2}{2z_0^2} \right] - z_0 \left[ 1 + \frac{(x - |BF'|)^2 + y^2}{2z_0^2} \right], \quad (5)$$

式中  $|AF'| = |BF'| = f' \tan \theta$ , 代入(5)式可得

$$\Delta = \frac{2f' \tan \theta}{z_0} x, \quad (6)$$

将(6)式代入(3)式可以得到干涉场强度为

$$I(C) = \left(\frac{E_{10}}{|AC|}\right)^2 + \left(\frac{E_{20}}{|BC|}\right)^2 + 2\left(\frac{E_{10}}{|AC|}\right)\left(\frac{E_{20}}{|BC|}\right)\cos\left[k_0 \frac{2f' \tan \theta}{z_0} x + (\phi_{20} - \phi_{10})\right], \quad (7)$$

式中  $k_0$ 、 $f'$ 、 $\theta$  均为常量,因此在光电管光敏面上干涉条纹强度沿  $x$  方向按余弦规律变化,干涉条纹为平行于  $y$  轴的等间距直条纹,条纹间距为

$$\Delta x = \frac{\lambda z_0}{2f' \tan \theta} \approx \frac{\lambda z_0}{2f' \theta}. \quad (8)$$

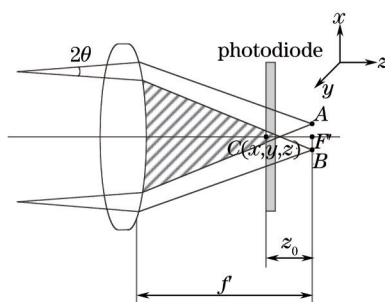


图2 干涉条纹在透镜后方的成像

Fig.2 Imaging of the interference fringe patterns behind lens

经透镜透射后,RLG出射光将在透镜后方空间交叠区域形成干涉,干涉条纹间距反比于透镜焦距,正比于探测器到焦点的距离(探测器置于焦点前)。上述推导过程表明,RLG输出的干涉条纹(光斑)将在透镜的像方空间产生等比缩放,在任何光束交叠区域都能观察到等比缩小的干涉条纹。

### 3.3 干涉条纹对比度分析

考虑到影响干涉条纹对比度的主要因素是两相干光束的振幅比、光源的大小及光源的非单色性<sup>[10]</sup>,在RLG读出系统中,光束振幅比和光源非单色性的影响可以忽略,干涉条纹对比度主要受制于会聚透镜在焦面上的

光斑大小,设焦面上两光斑直径均为 $b$ ,探测器上 $C$ 点干涉孔径角为 $\beta$ ,则干涉条纹对比度表达式为

$$K = \left| \frac{\lambda}{\pi b \beta} \sin \frac{\pi b \beta}{\lambda} \right|. \quad (9)$$

由(9)式可知,当会聚光斑直径增大时,干涉条纹对比度会迅速下降,影响陀螺输出信号的检测。考虑到RLG对外围器件尺寸的小型化要求,透镜的焦距要尽可能小以便节省空间。采用单透镜将带来较大的球差和干涉条纹对比度。如果为了校正像差而采用多片透镜结构,则会使读出系统体积过大。由此可见,这里使用菲涅耳透镜最合适。

## 4 基于菲涅耳透镜的RLG抗辐照读出系统

### 4.1 菲涅耳透镜原理及特点

菲涅耳透镜是一种特殊的光阑,它通过将奇数波带或偶数波带挡住(或加工成不同厚度以叠加间隔为 $\pi$ 的相位差),利用衍射产生类似于透镜的聚光效果,其成像原理如图3所示。相比于普通透镜,菲涅耳透镜具有以下优势:

1) 对近轴光线的球差校正效果更好。由于RLG的顺、逆时针出射光接近平行光出射,会聚时产生的像差主要是球差。借助现代计算机控制技术的便利,菲涅耳透镜能够确保每个环带的精确切割,使几乎所有的近轴光线准确会聚到焦点,极大地避免了球差。因此,相比普通透镜,对于RLG输出光具有更好的会聚效果,其干涉条纹对比度也会更高;

2) 可以实现更小的 $F$ 数。由于结合了非球面面型和薄透镜的优点,菲涅耳透镜允许在短焦距的性能下增大孔径,使其能够实现小于1的 $F$ 数,这使得探测器能够安装在离菲涅耳透镜很近的位置,减小了读出系统的尺寸;

3) 厚度很小,易于安装。菲涅耳透镜能够以蚀刻的方式在极薄的玻璃基底上实现加工,很容易实现0.5 mm以下的厚度。此外,相对于透镜球型轮廓,菲涅耳透镜外形近似于平行平板,更易于安装在RLG合光棱镜出射面。

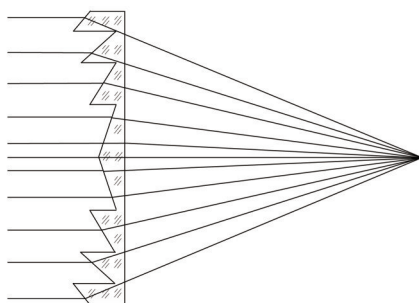


图3 菲涅耳透镜会聚成像原理图

Fig.3 Convergent imaging of a Fresnel lens

### 4.2 单透镜与菲涅耳透镜仿真结果比较

为了进一步比较单透镜、菲涅耳透镜对RLG输出光的会聚效果,现假设陀螺出射光直径为1 mm,光学元件外径为2 mm,后截距为1.5 mm,使用Zemax软件对两者的聚光效果进行仿真。仿真结果如图4和图5所示。

对比图4和图5中的光学元件,首先从图4(b)和图5(b)的点列图得到,在焦平面上,单透镜成像光斑直径为 $4.7 \mu\text{m}$ ,菲涅耳透镜光斑直径达到了 $30.1 \mu\text{m}$ ,说明后者具有更强的会聚作用;其次,从图4(c)和图5(c)的调制传递函数曲线中可以看到,单透镜的调制传递函数远达不到衍射极限水平,其像差很大,干涉条纹会产生变形,而菲涅耳透镜的调制传递函数非常接近衍射极限,说明其像差很小,干涉条纹几乎不产生变形;最后,从图4(a)和图5(a)中得到,菲涅耳透镜厚度为0.5 mm,而单透镜厚度为1 mm,这表明前者更便于安装。

另外,由于探测器分辨率有限,干涉条纹光斑并不能无限制地减小。实际情况是,根据探测器的分辨率,将探测器置于透镜焦平面前方一定距离处。根据目前使用光电管的具体参数,将图5所示仿真系统中的探测器置于距焦点 $0.1f'$ 处,用Zemax软件进行仿真,此时探测器接收到的干涉条纹光斑直径为0.08 mm。相

对原 RLG 读出系统,探测器光敏面面积下降百分比  $P$  为

$$P = 1 - \frac{\pi \cdot r_1^2}{\pi \cdot r_2^2} = 99.36\%, \quad (10)$$

式中  $r_1$ 、 $r_2$  分别为新、老读出方案中 RLG 输出的光斑半径。由此可见,基于菲涅耳透镜的 RLG 抗辐照解调方案,能够将光电管的尺寸要求降低到原水平的 1% 以下,极大地降低辐照对光电管性能,乃至整个读出系统性能的影响。

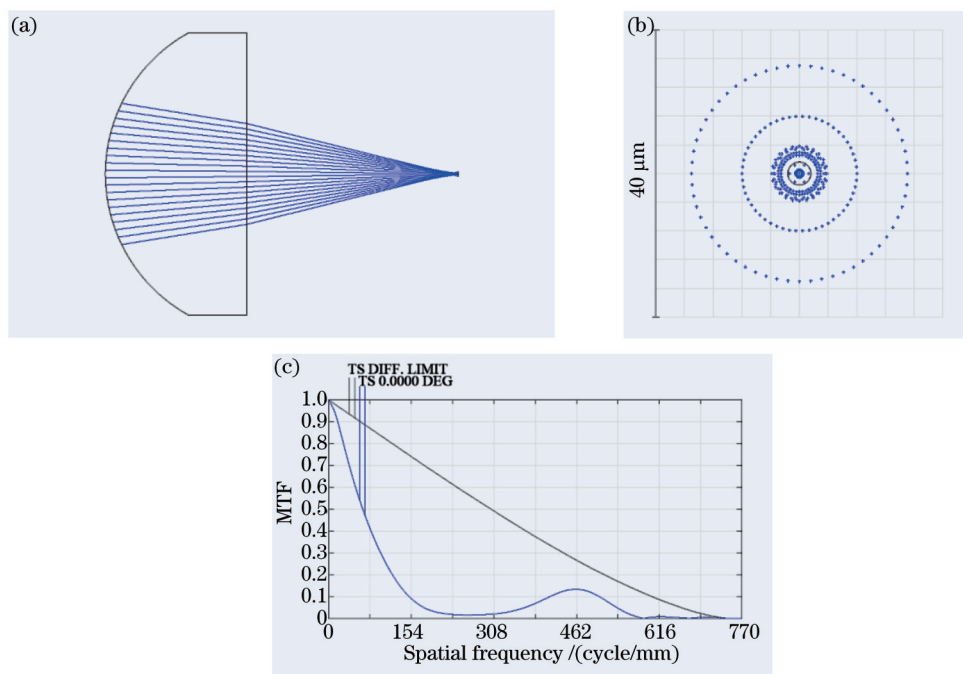


图 4 凸透镜仿真结果。(a) 凸透镜模型示意图; (b) 凸透镜头点列图; (c) 凸透镜调制传递函数曲线  
Fig.4 Simulation result of convex. (a) Sketch of convex lens model; (b) spot diagram of convex lens; (c) modulation transfer function of convex lens

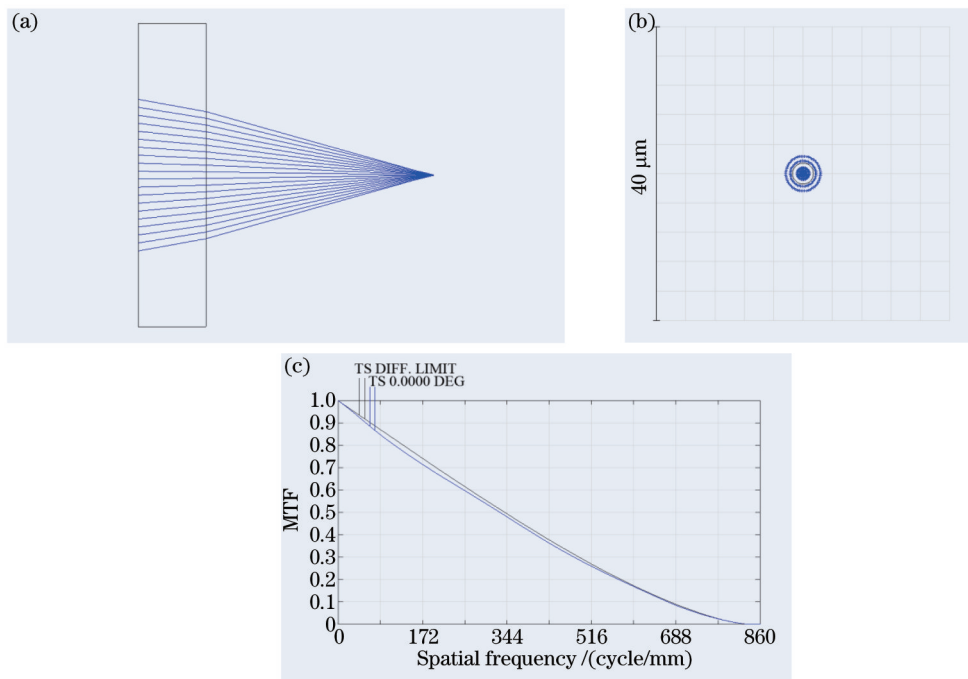


图 5 菲涅耳透镜仿真结果。(a) 菲涅耳透镜模型示意图; (b) 菲涅耳透镜头点列图; (c) 菲涅耳透镜调制传递函数曲线  
Fig.5 Simulation result of Fresnel lens. (a) Sketch of Fresnel lens; (b) spot diagram of Fresnel lens; (c) modulation transfer function of Fresnel lens

## 5 结 论

经透镜会聚后,RLG输出光形成的干涉条纹将在其像方焦平面前方发生等比缩小,如此可选用尺寸更小的光电管进行接收,从而降低空间辐照对陀螺读出系统的影响。理论计算和仿真结果表明,相比于传统透镜,采用菲涅耳透镜在球差校正、安装便利性等方面具备明显优势。基于菲涅耳透镜的RLG读出系统,相比传统的RLG解调系统,能够将光电管的尺寸要求降低到原水平的1%以下,有效地降低了辐照对光电管性能的影响,显著提高了RLG的抗辐照能力及航天环境适用性。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Overview of four-mode differential laser gyros[J] Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(4): 040005.  
汪之国,龙兴武,王 飞. 四频差动激光陀螺综述[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 040005.
- 2 Charles Lennon, Tim Richmond. LN100S-common optical payload and bus gyro reference assembly[J]. Advance in the Astronautical Sciences, 2001, 107: 425-440.
- 3 Steven P Hotaling. Radiation Resistant RLG Detector Systems: US, 5404007[P]. 1995-04-04.
- 4 James W Bergstrom, Allen J Cox, Teresa A Fritz. Radiation-hardened RLG Readout: US, 6914929[P]. 2005-07-05.
- 5 张建新. 辐照对硅光电二极管可靠性影响的研究[J]. 红外, 2005, 26(9): 25-31.
- 6 Cao Xin. Study on photoelectric characteristic of Both the Thin-Films of a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>Ge<sub>y</sub>H and a-Si:H/4H-SiC[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013.  
曹 鑫. a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>Ge<sub>y</sub>H薄膜及a-Si:H/4H-SiC光电特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2013.
- 7 Zhang Rong. Photocurrent of Hydrogenated Nanocrystalline Silicon Thin Film[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.  
张 榕. 氢化纳米硅薄膜光电导性质研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- 8 Jiang Ya'nan. Ring Laser Gyro[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. 214-217.  
姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985. 214-217.
- 9 Yu Wendong, Lü Wancheng, Chen Linfeng, *et al.*. Study on separate LCP from RCP based on multioscillator ring laser gyroscope with optical signal processing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0814001.  
于文东,吕晚成,陈林峰,等. 四频差动激光陀螺左右旋模式光学解调分离方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0814001.
- 10 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics (2nd Edition)[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.  
郁道银,谈恒英. 工程光学(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

栏目编辑: 张 雁