

文章编号 1004-924X(2014)06-1424-06

偏振导航传感器测角误差分析与补偿

杨中光*, 周 军, 黄 河, 刘莹莹

(西北工业大学 精确制导与控制研究所, 陕西 西安 710072)

摘要: 借鉴沙漠蚂蚁等昆虫利用天空偏振模式进行导航的方法, 设计了偏振传感器来获取导航系统的航向角。为提高偏振传感器的测角精度, 研究了影响偏振传感器测角精度的误差因素与补偿方法。讨论了如何利用偏振传感器从天空偏振模式中提取偏振方位角信息的方法, 分析了影响偏振测角精度的主要误差因素, 建立了偏振传感器的测角误差模型。根据测角误差模型, 推导了偏振方位角的解算方法, 并利用最小二乘法, 通过估算模型的误差参数值间接补偿测角误差。最后, 采用提出的误差补偿算法在晴朗天气下进行了实验测试。测试结果表明: 误差补偿后测角精度得到明显提高, 约为 $0.17^\circ (3\sigma)$ 。实验结果验证了提出的误差补偿算法可以实现对角度误差的有效补偿。

关键词: 偏振光导航; 偏振传感器; 偏振模式; 最小二乘法; 角度测量; 误差补偿

中图分类号: TP212.14; V241.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142206.1424

Analysis and compensation of angle errors of polarization navigation sensors

YANG Zhong-guang*, ZHOU Jun, HUANG He, LIU Ying-ying

(Institute of Precision Guidance and Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

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

Abstract: A polarization angle sensor was designed to gain the azimuth angle of a navigation system by learning from desert ants using the polarized pattern for navigation. To improve the measuring accuracy of the polarization angle, the factors influencing the angular errors were analyzed and the compensation method was researched. Based on the polarization principles, how to obtain the information of polarized azimuth angle from a sky polarization pattern was discussed, the main factors influencing the angular error measurement was analyzed, and a polarization angle error measuring model was built. According to the model, the solution to the polarization azimuth angle was deduced and the Least Square Method (LSM) of error compensation was presented to indirectly compensate the angular error by estimating the error parameters of the model. An experiment was performed eventually when the weather was fine. The experimental results show that the angular error is less than 0.17 degree (3σ), which indicates that the accuracy of the polarization angle is improved. The experiment demonstrates that the algorithm is feasible to compensate angular errors.

Key words: polarization navigation; polarization sensor; polarization pattern; Least Square Method (LSM); angle measurement; error compensation

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2013-10-16.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA120602)

1 引言

随着导航技术的不断进步,传统的导航手段如惯性导航,无线电导航,天文导航以及卫星导航等,已不能满足其发展需求。偏振光导航作为一种新的仿生导航手段,具有抗干扰能力强、精度高和误差不随时间累积等优点,因而有着广泛的应用前景^[1]。

太阳光经过大气散射后,形成一种有规律的偏振模式,自然界生物利用该偏振模式确定参考方向,从而实现自主导航。20世纪初,人们针对蚂蚁、蜜蜂等几种昆虫神奇的导航本领进行了研究,逐步发现它们利用天空偏振模式进行导航,之后又有学者对此进行了广泛而深入的研究。有研究者^[2-4]深度剖析了蜜蜂眼部的生理构造与其相关生理行为,分析了蜜蜂如何感知偏振模式并将其应用于导航。Goddard^[5]等人研究了藻虾等水生节肢动物,发现一些水生动物也能利用天空偏振模式进行导航。Lambrinos^[6]等学者对昆虫的导航策略进行了研究,并将偏振测角单元成功应用于移动机器人 Sahabot,从而验证了昆虫的导航策略。Sarkar^[7]等人根据偏振测角原理研制了一种 CMOS 图像传感器,为偏振导航传感器的微型化奠定了基础。在国内,卢鸿谦^[8]等人从理论上分析了偏振光对组合导航系统的辅助作用。周军等人将偏振光导航的方法推广到大气层外,用于航天器的自主姿态确定与自主导航^[9]。还有研究人员提出了仿生导航系统航向角的解算方法,并设计仿生测角传感器进行实验测试,证明了偏振测角的可行性^[10-12]。崔岩等人探究了太阳光与月光对曙暮光偏振模式的影响,研究表明在曙暮光时分天空偏振模式中太阳光偏振模式起主导作用^[13]。

虽然国内外研究者对偏振传感器进行了大量的实验测试,但是对于引起偏振传感器测角误差的因素还缺乏系统的分析。本文基于偏振传感器的测角原理,比较全面地分析了各种影响测角精度的误差因素,建立了偏振传感器测角误差模型,并利用最小二乘法对测角误差进行了补偿。

2 偏振测角原理

太阳光穿过大气层时会发生散射。当分子线度远小于入射光波长时会发生瑞利散射,在入射光的电矢量作用下,分子中的电子以入射光频率做受迫振动并从入射光波取得能量,发出辐射。这种辐射就是散射光,其频率或波长与入射光相同^[14]。在入射光为自然光的条件下,瑞利散射光的偏振度为:

$$d(\gamma) = \frac{1 - \cos^2 \gamma}{1 + \cos^2 \gamma} \times d_{\max}, \quad (1)$$

式中: γ 为入射光方向与散射光方向之间的夹角, d_{\max} 为最大偏振度。在理想状况下 d_{\max} 为1,但受各种因素的影响,实际中 d_{\max} 一般小于1,因此散射光为部分偏振光。通常用偏振度和偏振方位角来表示部分偏振光。在测量天空偏振模式时,把待测散射光方向称为观测方向,垂直于入射光与散射光所在平面的方向称为散射光的最大偏振方向,待测散射光 \mathbf{E} 矢量所在平面的太阳投影方向为太阳子午线方向,三个方向两两正交。其中,太阳子午线方向一般作为导航的参考方向,它与偏振传感器的基准方向之间的夹角为偏振方位角 φ 。

偏振传感器由三对偏振对立单元组成,每一对单元由两个蓝色滤光片,两个偏振方向相互正交的偏振片,两个光敏二极管和一个对数放大器构成。偏振传感器示意图^[9]如图1所示,靠近太阳子午线方向的3个偏振片的偏振方向与偏振传感器的基准方向之间的夹角分别为 $0, 60, 120^\circ$, φ 表示偏振方位角。

偏振传感器的3路输出电压信号与偏振方位角 φ 之间的理想关系^[9]为:

$$\begin{cases} U_1 = \log \frac{1 + d \times \cos 2(\varphi + 60^\circ)}{1 - d \times \cos 2(\varphi + 60^\circ)} \\ U_2 = \log \frac{1 + d \times \cos 2\varphi}{1 - d \times \cos 2\varphi} \\ U_3 = \log \frac{1 + d \times \cos 2(\varphi + 120^\circ)}{1 - d \times \cos 2(\varphi + 120^\circ)} \end{cases} \quad (2)$$

上述公式中,电压信号 U 已知,任选两式即可解算出偏振方位角 φ 。然而实际测量时会产生各种各样的误差,比如滤光片实际透过率不相同,因此式(2)为理想模型。

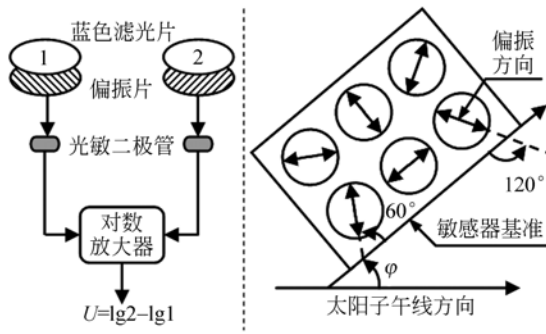


图 1 偏振传感器及其测角示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polarization sensor and angle measurement

3 偏振测角误差分析与误差模型

本文从偏振传感器的光路与标定过程两个方面来分析偏振传感器的测角精度。

偏振传感器工作时,首先利用滤光片选取一定波段的光,然后通过偏振片选取特定偏振方向的光,最后经过光敏二极管和对数放大将光信号转换为电信号。该过程中主要存在两种误差:光学器件透过率不同带来的误差,称为透过率误差 f_i ;偏振片真实的偏振方向与所要求的方向存在误差角,称为装配误差 $\Delta\theta_{pi}$ 。

偏振传感器标定时,首先要将偏振传感器的基准与太阳子午线对准,然后采集电压信号,标定过程中用精密转台调整角度。该过程中主要存在 3 种误差:偏振传感器的基准与太阳子午线对准时带来的误差,称为初始对准误差 $\Delta\theta_0$;信号采集过程带来的误差,该误差受数据采集卡的分辨率、光电噪声和电热噪声的影响,称为信号采集误差 v_i ;转台自身固有的误差,称为转台误差 $\Delta\theta_r$ 。

在上述各种误差中,透过率误差,装配误差以及对准误差是固定不变的,可以通过标定来估算这些参数,以减小这些误差的影响。但是转台误差以及信号采集误差等误差是无法进行补偿的,因此需要选取高精度转台及高分辨率数据采集卡来减小它们的影响。

由于对数放大器的增益为 0.5,根据上述误差因素建立的测角误差模型为:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{1}{2} \left\{ \lg \frac{1 + d \cos 2(\varphi + 60^\circ + \Delta\theta_1)}{1 - d \cos 2(\varphi + 60^\circ + \Delta\theta_2)} + f_1 \right\} + v_1 \\ U_2 = \frac{1}{2} \left\{ \lg \frac{1 + d \cos 2(\varphi + \Delta\theta_3)}{1 - d \cos 2(\varphi + \Delta\theta_4)} + f_2 \right\} + v_2 \\ U_3 = \frac{1}{2} \left\{ \lg \frac{1 + d \cos 2(\varphi + 120^\circ + \Delta\theta_5)}{1 - d \cos 2(\varphi + 120^\circ + \Delta\theta_6)} + f_3 \right\} + v_3 \end{cases}, \quad (3)$$

其中:

$$\Delta\theta_i = \Delta\theta_0 + \Delta\theta_{pi} + \Delta\theta_r, (i=1, 2, \dots, 6), \quad (4)$$

式中: $\Delta\theta$ 表示初始对准误差; $\Delta\theta_{pi}$ 表示装配误差; $\Delta\theta_r$ 表示转台误差; f_1, f_2 和 f_3 表示透过率误差; v_1, v_2 和 v_3 表示信号采集误差。

令:

$$\begin{cases} p_{11} = \cos 2\omega_{11} + 10^{2(U_1 - v_1) - f_1} \times \cos 2\omega_{12} \\ p_{22} = \sin 2\omega_{21} + 10^{2(U_2 - v_2) - f_2} \times \sin 2\omega_{22}, (i=1, 2, 3), \\ p_{33} = 10^{2(U_3 - v_3) - f_3} - 1 \end{cases}, \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \omega_{11} = 60^\circ + \Delta\theta_1, \omega_{12} = 60^\circ + \Delta\theta_2 \\ \omega_{21} = \Delta\theta_3, \omega_{22} = \Delta\theta_4 \\ \omega_{31} = 120^\circ + \Delta\theta_5, \omega_{32} = 120^\circ + \Delta\theta_6 \end{cases}. \quad (6)$$

则式(3)可以化为:

$$\begin{cases} d \times (p_{11} \times \cos 2\varphi - p_{12} \times \sin 2\varphi) = p_{13} \\ d \times (p_{21} \times \cos 2\varphi - p_{22} \times \sin 2\varphi) = p_{23} \\ d \times (p_{31} \times \cos 2\varphi - p_{32} \times \sin 2\varphi) = p_{33} \end{cases}. \quad (7)$$

任取式(7)中两式相比,即可得到偏振方位角 φ 。设由 60° 通道和 0° 通道计算得到的偏振方位角为 φ_{12} , 由 60° 通道和 120° 通道计算得到的偏振方位角为 φ_{13} , 由 0° 通道和 120° 通道计算得到的偏振方位角为 φ_{23} 。以 φ_{12} 计算为例,则有:

$$\frac{p_{11} \times \cos 2\varphi_{12} - p_{12} \times \sin 2\varphi_{12}}{p_{21} \times \cos 2\varphi_{12} - p_{22} \times \sin 2\varphi_{12}} = \frac{p_{13}}{p_{23}}. \quad (8)$$

解该方程得:

$$\varphi = \varphi_{12} = \frac{1}{2} \times \tan^{-1} \left\{ \frac{p_{11} p_{23} - p_{21} p_{13}}{p_{12} p_{23} - p_{22} p_{13}} \right\}. \quad (9)$$

同理可以得到 φ_{13} 和 φ_{23} , 将 φ 角代入式(3)即可得到偏振度 d 。

4 测角误差补偿算法

误差补偿前,要分析引起测角误差的主要因素,然后建立比较准确的误差模型,最后将误差模型线性化,利用最小二乘法迭代估计得到模型的误差参数。将这些参数代入误差模型可以计算得

到偏振方位角,从而提高偏振测角精度。该方法能够有效减小主要误差因素对测角误差的影响。

以偏振方位角 φ_{12} 的计算为例,令误差向量为:

$$\boldsymbol{\psi} = (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, f_1, f_2)^T,$$

把 $\boldsymbol{\psi}$ 作为未知误差向量参数,将方位角解算公式(9)在 $\boldsymbol{\psi}_0 = (0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ 进行一阶泰勒展开,忽略高阶小量可得:

$$\varphi = \varphi_{12}(\boldsymbol{\psi}_0) + \left. \frac{\partial \varphi_{12}}{\partial \boldsymbol{\psi}^T} \right|_{\boldsymbol{\psi}=\boldsymbol{\psi}_0} \times \boldsymbol{\psi}. \quad (10)$$

上式为 φ 关于误差向量 $\boldsymbol{\psi}$ 的线性化方程,而标定时可以得到 n 组 φ 角测量值($n \geq 6$),记:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Phi} &= [\varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}, \dots, \varphi^{(n)}]^T \\ \boldsymbol{\Phi}_{12}(\boldsymbol{\psi}_0) &= [\varphi_{12}^{(1)}, \varphi_{12}^{(2)}, \dots, \varphi_{12}^{(n)}]^T \Big|_{\boldsymbol{\psi}=\boldsymbol{\psi}_0} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\psi}_0) = \left[\left. \frac{\partial \varphi_{12}^{(1)}}{\partial \boldsymbol{\psi}}, \frac{\partial \varphi_{12}^{(2)}}{\partial \boldsymbol{\psi}}, \dots, \frac{\partial \varphi_{12}^{(n)}}{\partial \boldsymbol{\psi}} \right]^T \Big|_{\boldsymbol{\psi}=\boldsymbol{\psi}_0}$$

则有:

$$\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\Phi}_{12}(\boldsymbol{\psi}_0) + \mathbf{J}(\boldsymbol{\psi}_0) \times \boldsymbol{\psi}. \quad (12)$$

利用最小二乘法解矛盾方程组可以得到:

$$\boldsymbol{\psi} = (\mathbf{J}^T(\boldsymbol{\psi}_0) \mathbf{J}(\boldsymbol{\psi}_0))^{-1} \times \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\psi}_0) (\boldsymbol{\Phi} - \boldsymbol{\Phi}_{12}(\boldsymbol{\psi}_0)). \quad (13)$$

由于非线性函数值在较小范围内被当作线性函数处理,当 $\boldsymbol{\psi}$ 较大时,应采用迭代法求解,即有:

$$\boldsymbol{\psi}_{k+1} = \boldsymbol{\psi}_k + (\mathbf{J}^T(\boldsymbol{\psi}_k) \mathbf{J}(\boldsymbol{\psi}_k))^{-1} \times \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\psi}_k) (\boldsymbol{\Phi} - \boldsymbol{\Phi}_{12}(\boldsymbol{\psi}_k)). \quad (14)$$

式(14)从 $\boldsymbol{\psi}_0$ 开始迭代,直至 $\boldsymbol{\psi}_{k+1}$ 与 $\boldsymbol{\psi}_k$ 的差值小于要求的精度,此时可以得到 $\boldsymbol{\psi}$ 的估计值 $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ 。

同理,对 φ_{13} 和 φ_{23} 亦可以得到相同结论。将上述误差参数向量 $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ 代入误差模型中,即可解算估计出补偿后的方位角 φ 。由于实际测量过程中存在各种随机误差和噪声,同时还受线性化所带来的误差的影响,因此得到的 $\boldsymbol{\psi}$ 值为近似值。

测角误差 $\Delta\varphi$ 可以表示为:

$$\Delta\varphi = \varphi - \hat{\varphi}, \quad (15)$$

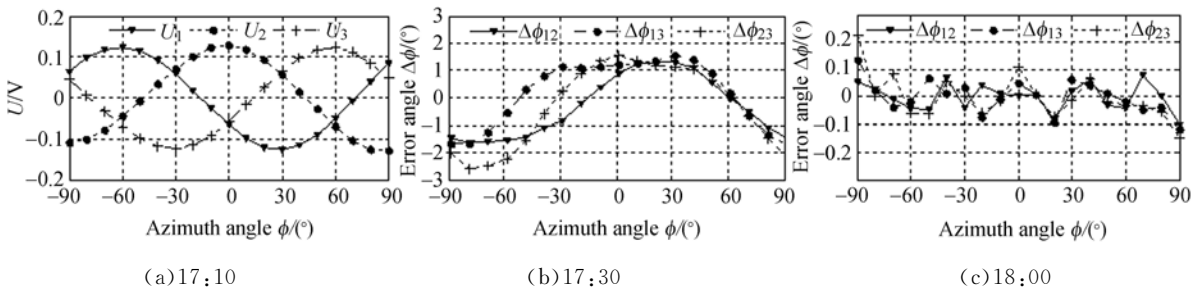


图 3 实验测得的测角误差变化
Fig. 3 Angular errors from test

其中: φ 表示实际方位角, $\hat{\varphi}$ 表示利用偏振测角模型解算得到的方位角。

5 实验测试与分析

5.1 实验测试

实验地点选在西北工业大学航天学院楼顶,其经纬度为东经 $108^{\circ}32'48''$,北纬 $34^{\circ}8'41''$ 。实验装置如图 2 所示,三轴转台用于调整方位角的变化,数据采集卡 USB4716 用于采集电压信号。在实验测试前,先将转台调至水平。



图 2 偏振光测试装置
Fig. 2 Polarization test system

实验测试时,等间隔调整一次转台并采集数据,偏振方位角的角度选择为 $-90 \sim 90^{\circ}$ 。共采集数据 3 次,采集时刻分别为 2013 年 5 月 22 日 17:10, 17:30 和 18:00,实验结果对应图 3(a), 3(b) 和 3(c)。天气晴朗,每次采集时长约为 10 min。

5.2 实验分析

图 4 为不考虑各种误差因素,按照理想模型计算得到的测角误差变化,图 5 为利用最小二乘法估算误差参数并进行误差补偿后的测角误差变化。

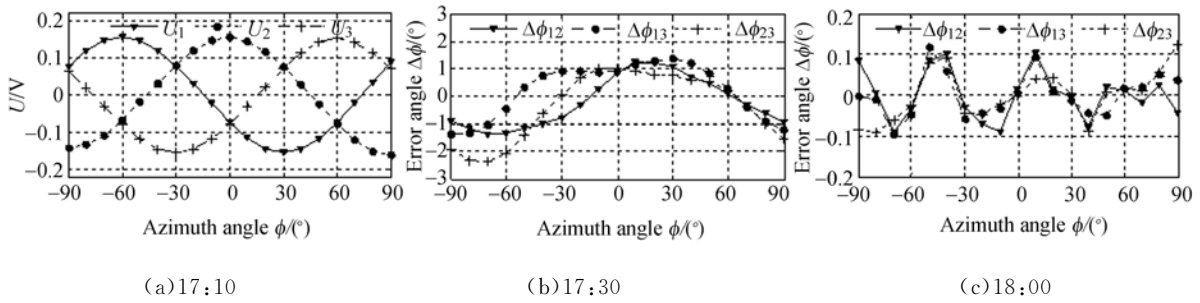


图 4 理论模型计算得到的测角误差

Fig. 4 Angular errors calculated by theoretical models

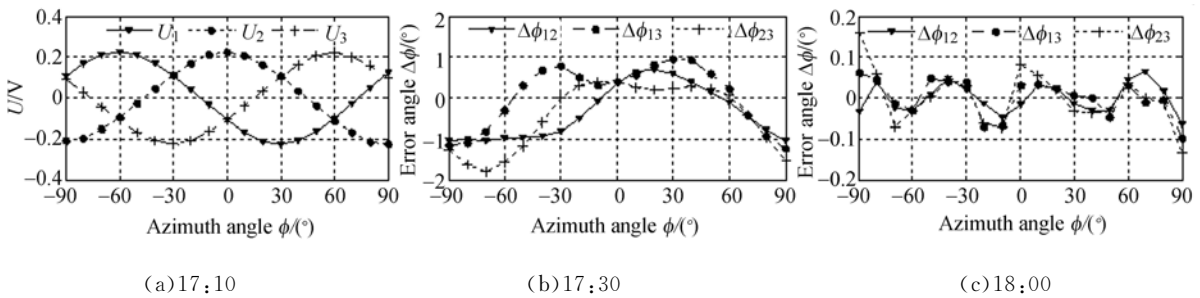


图 5 补偿后的测角误差变化

Fig. 5 Angular errors after compensation

利用最小二乘法进行误差补偿后,得到的测角误差如表 1 所示。

表 1 补偿后的测角误差(3σ)

Tab. 1 Angular errors after compensation (3σ) (°)

	$\Delta\varphi_2$	$\Delta\varphi_3$	$\Delta\varphi_3$
a 组	0.15	0.18	0.24
b 组	0.18	0.16	0.18
c 组	0.11	0.13	0.19

由误差曲线可以看出,补偿前的测角误差大都在 2°之内;而误差补偿之后,测角误差平均约为 0.17°(3σ),误差补偿后测角精度得到明显提高。因此,根据误差补偿算法估算误差向量参数,能有效补偿测角误差。补偿后的测角误差主要受

转台精度以及信号采集误差的影响,而这些因素引起的测角误差难以再进行补偿。

6 结 论

本文根据偏振传感器测角原理,分析了影响偏振传感器测角误差的主要因素,并给出了偏振传感器测角误差模型。基于测角误差模型,利用最小二乘算法估算误差参数并补偿测角误差,解决了偏振传感器测角精度受各种误差因素影响的问题。实验结果表明,角度误差补偿算法能有效提高偏振测角精度,补偿后的测角误差平均可以达到 0.17°(3σ),显示该误差补偿算法可以有效补偿偏振导航传感器的测角误差。

参考文献:

[1] 赵开春,卢皓,尤政. 天空光偏振模式自动探测装置[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(2): 239-245.
ZHAO K CH, LU H, YOU ZH. Automatic detection system for skylight polarized pattern[J]. *Opt. Preci-*

sion Eng., 2013, 21(2): 239-245. (in Chinese)

[2] ROSSEL S, WEHNER R. Polarization vision in bees[J]. *Nature*, 1986, 323: 128-131.
[3] SNYDER A W, PASK C. How bees navigate[J]. *Nature*, 1972, 239: 48-50.
[4] GLAS H W VAN. Models for unambiguous E-vec-

- tor navigation in the bee[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 1977, 113:129-159.
- [5] GODDARD S M, FORWARD Jr R B. The role of the underwater polarized light pattern, in sun compass navigation of the grass shrimp, *Palaemonetes vulgaris*[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 1991, 169(4):479-491.
- [6] LAMBRINOS D. A mobile robot employing insect strategies for navigation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30(1):39-64.
- [7] SARKAR M, SAN SEGUNDO B D, van HOOFF C, et al.. Integrated polarization analyzing CMOS image sensor for autonomous navigation using polarized light[C]. *Intelligent Systems (IS)*, 2010 5th IEEE International Conference. IEEE, 2010: 224-229.
- [8] 卢鸿谦,黄显林,尹航. 三维空间中的偏振光导航方法[J]. *光学技术*, 2007, 32(3):412-415.
LU H Q, HUANG X L, YIN H. Polarized-light-based navigation in three-dimensional space[J]. *Optical Technique*, 2007, 32(3):412-415. (in Chinese)
- [9] 周军,刘莹莹. 基于自然偏振光的自主导航新方法研究进展[J]. *宇航学报*, 2009, 30(2):409-414.
ZHOU J, LIU Y Y. Research progress of polarized skylight navigation [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2):409-414. (in Chinese)
- [10] 晏磊,关桂霞,陈家斌,等. 基于天空偏振光分布模式的仿生导航定向机理初探[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2009, 45(4):616-620.
YAN L, GUAN G X, CHEN J B, et al.. The bionic orientation mechanism in the skylight polarization pattern[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(4):616-620. (in Chinese)
- [11] 褚金奎,赵开春,张强,等. 新型仿生偏振测角传感器及角度误差补偿算法[J]. *宇航学报*, 2009, 30(2):503-509.
CHU J K, ZHAO K CH, ZHANG Q, et al.. A novel polarization angle sensor and error compensation algorithm for navigation[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2):503-509. (in Chinese)
- [12] 褚金奎,王志文,张英杰,等. 多方向金属光栅偏振器及在偏振导航中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10):2237-2244.
CHU J K, WANG ZH W, ZHANG Y J, et al.. Multi-oriented wire-grid polarizer and its application to polarization navigation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10):2237-2244. (in Chinese)
- [13] 崔岩,高启升,褚金奎,等. 太阳光与月光对曙暮光偏振模式的影响[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1):34-39.
CUI Y, GAO Q SH, CHU J K, et al.. Influence of sunlight and moonlight on polarization patterns during twilight[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):34-39. (in Chinese)
- [14] 蔡履中. *光学*[M]. 北京:科学出版社,2007.
CAI L ZH. *Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)

作者简介:



杨中光(1989—),男,山东潍坊人,博士研究生,2011年于西北工业大学获得学士学位,主要从事偏振光导航等自主导航新方法的研究。E-mail: yang_zhong_guang@126.com

导师简介:



周军(1966—),男,江苏常州人,教授,博士生导师,1990年,1993年于西北工业大学分别获得硕士、博士学位,现为西北工业大学精确制导与控制研究所所长,主要从事航天器、导弹制导与控制,先进控制理论及应用的研究。E-mail:zhoujun@nwpu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)