

文章编号 1004-924X(2011)03-0598-07

# 俯仰角组合测量系统的设计

潘明华,文香稳,朱国力

(华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

**摘要:**利用准直激光、单轴倾角仪和 CCD 摄像机建立了一种俯仰角组合测量系统以提高俯仰角测量的精度和稳定性。首先,给出了俯仰角组合测量模型,基于坐标旋转算法和迭代方法研究了俯仰角的组合测量原理。然后,采用蒙特卡罗法对影响组合测量系统精度的各个因素进行了全局灵敏度分析。结果表明,与目前工程测量中普遍采用的倾角仪直接测量俯仰角法相比,组合测量法能够获得更高的测量精度和稳定性。利用高精度三轴转台进行的俯仰角测量实验表明:±8°测量范围内,组合测量法误差绝对值最大为 0.3 mrad,标准差为 0.16 mrad。理论分析和实验结果证明,提出的组合测量法有效地提高了俯仰角测量精度和稳定性,适合工程上的测量需要。

**关键词:**俯仰角测量;CCD 摄像机;组合测量;蒙特卡罗法

**中图分类号:** TB92; TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111903.0598

## Design of combination measurement system for pitching angles

PAN Ming-hua, WEN Xiang-wen, ZHU Guo-li

(*State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology,  
Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China*)

**Abstract:** A combination measurement system for pitching angles was put forward based on a collimated laser, a single-axis inclinometer and a CCD camera to improve the precision and stability of measuring pitching angles in engineering. The combination measurement model was introduced and its combination measurement principle was studied in detail on the basis of the coordinate rotation algorithm and the iteration method. The global sensitive analysis of each factor affecting the combination measurement was carried out by using Monte Carlo method. Obtained results show that compared with the direct measurement method with an inclinometer widely used in pitching angle measuring at present, the proposed method can obtain much higher measurement precision and stability. A measurement experiment on a highly accurate three-axis turntable was performed, which indicates that the maximum absolute error is 0.3 mrad and the standard deviation is 0.16 mrad. These data are better than that from the direct measurement method with the inclinometer, and meet the requirements of the engineering applications.

**Key words:** pitching angle measurement; CCD camera; combination measurement; Monte Carlo method

收稿日期:2010-04-20;修订日期:2010-10-30.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展规划资助项目(No. 2007CB714005)

## 1 引言

目前许多大型工程机械都实现了自动控制,为确保自动控制的可靠性及施工的安全性,需要对其运动执行机构进行高精度的实时姿态测量,以实现有效的运动控制,但以光栅测角、激光干涉测角和激光自准直测角为代表的高精度(测量误差 $<1''$ )测角装置主要应用于精密加工、航空航天、军事和通讯等领域,系统结构复杂、测角量程小,抗干扰性差,不适用于工程机械的姿态测量领域。在工程机械的姿态角测量研究中,俯仰角及滚动角大多采用双轴倾角传感器直接进行测量,但倾角传感器输出信号具有明显的非线性特性,其受环境因素(如温度、振动等)的影响会发生漂移,稳定性较差。近年来,研究人员通过曲面拟合、神经网络等补偿算法来提高倾角传感器的精度,取得了一定效果,但精度和稳定性仍不够理想。

电荷耦合器件(CCD)具有响应速度快、灵敏度高、动态范围大、工作电压低、抗冲击与震动、性能稳定、输出信号易于处理等优点。以准直激光和 CCD 组合的光学测量法,近年来已经作为一种快速、有效的非接触测量手段,在各种角度测量系统中得到了广泛应用<sup>[1-7]</sup>。因此,本文利用准直激光、单轴倾角仪和 CCD 摄像机构建了俯仰角的组合测量系统,并基于蒙特卡罗法<sup>[8-12]</sup>的误差分析和利用高精度的三轴转台的模拟实验证明了组合测量方法的可行性和有效性。

## 2 组合测量方法

### 2.1 测量模型

俯仰角的组合测量模型如图 1 所示,测量装置主要包括 CCD 摄像机和单轴倾角仪。由于任意平行光束透过凸透镜后会在凸透镜的焦平面上汇聚成一点,因此将 CCD 芯片调至摄像机镜头的焦平面上,从而使得激光器发射的准直激光经过镜头聚焦能在 CCD 芯片上形成一个近似圆形的光斑。准直激光的水平角和垂直角都可以由激光器直接测得。单轴倾角仪的测量轴与 CCD 表面的横坐标  $OX$  平行,用于实时测量运动物体绕自身轴线  $OY$  旋转的角度即滚动角  $\alpha$ 。如图 2 所示,滚动角  $\alpha$  不能直接通过倾角仪测量轴  $OX$  的测量

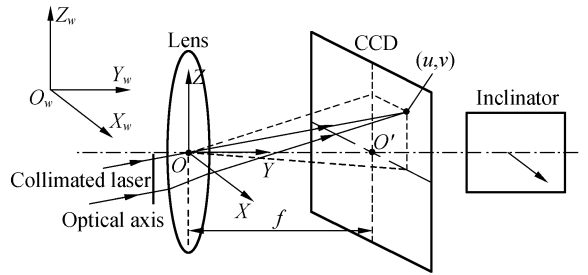


图 1 测量模型

Fig. 1 Measurement model

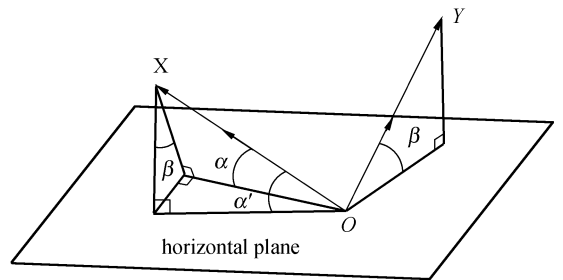


图 2 滚角与俯仰角关系

Fig. 2 Relation between rolling angle and pitching angle

值  $\alpha'$  得到,因为它还与轴线  $OY$  相对水平面的夹角即俯仰角  $\beta$  相关,两角度关系如式(1)所示。

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha'}{\cos \beta}\right). \quad (1)$$

为了描述准直激光的水平角、垂直角以及运动物体的姿态角,引入世界坐标系  $O_w-X_wY_wZ_w$ 。另外,以 CCD 摄像机的镜头光心为原点、光轴为  $Y$  轴建立固连在运动物体上的测量坐标系  $O-XYZ$ 。当测量坐标系和世界坐标系的方向一致时,可以认为运动物体的俯仰角  $\beta$  和滚动角  $\alpha$  都为 0;反之,运动物体所具有的俯仰角和滚动角可以看成是测量坐标系  $O-XYZ$  先沿轴线  $OX$  旋转俯仰角变为  $O-X'Y'Z'$ ,再沿轴线  $OY'$  旋转滚动角变为  $O-X''Y''Z''$  所引起的,各个角度旋转的正方向如图 3 所示。假设此时激光矢量在 CCD 上形成的光斑坐标为  $(u'', v'')$ ,则其在测量坐标系  $O-X''Y''Z''$  中可以表示为  $(u'', f, v'')$ ,将之归一化为  $R''$ ,即:

$$R'' = \frac{1}{\sqrt{f^2 + u''^2 + v''^2}} [u'' \quad f \quad v''], \quad (2)$$

式(2)及以下各式中的  $f$  均表示 CCD 摄像机镜头的焦距。

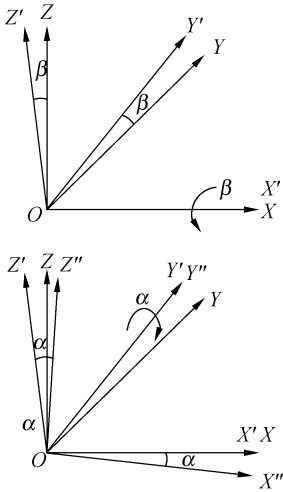


图 3 测量坐标系的旋转

Fig. 3 Rotation of measurement coordinate system

2.2 测量原理

为测得俯仰角, 首先将测量坐标系  $O-X''Y''Z''$

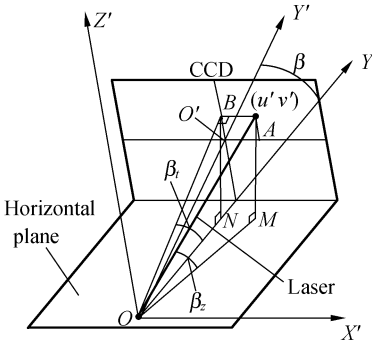


图 4 俯仰角的组合测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of combination measurement for pitching angle

沿轴线  $OY''$  旋转, 使其回到  $O-X'Y'Z'$ , 如图 4 所示。假设此时的光斑坐标变为  $(u', v')$ , 则激光矢量在  $O-X'Y'Z'$  坐标系中的单位矢量  $\mathbf{R}'$  可由式(3)求得。

$$\mathbf{R}' = \frac{1}{\sqrt{f^2 + u'^2 + v'^2}} [u' \quad f \quad v'] = \mathbf{R}'' \times \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (3)$$

由式(3)进一步可以求出光斑坐标  $(u', v')$  为

$$\begin{cases} u' = u'' \cos \alpha + v'' \sin \alpha \\ v' = -u'' \sin \alpha + v'' \cos \alpha \end{cases}. \quad (4)$$

在图 4 中,  $\beta_z$  表示准直激光的垂直角, 由几何

关系不难求得其在  $OY'Z'$  平面上的投影角  $\beta_i$  为

$$\beta_i = \arcsin(\sin \beta_z \times \frac{\sqrt{f^2 + u'^2 + v'^2}}{\sqrt{f^2 + v'^2}}), \quad (5)$$

则最终可获得俯仰角  $\beta$  为

$$\beta = \beta_i - \arctan(\frac{v'}{f}) = \arcsin(\sin \beta_z \times \frac{\sqrt{f^2 + u''^2 + v''^2}}{\sqrt{f^2 + (-u'' \sin \alpha + v'' \cos \alpha)^2}}) - \arctan(\frac{-u'' \sin \alpha + v'' \cos \alpha}{f}). \quad (6)$$

综上所述, 通过测量准直激光在 CCD 上形成的光斑坐标  $(u'', v'')$  并结合准直激光的垂直角  $\beta_z$  和单轴倾角仪测得的滚动角  $\alpha$ , 就可以通过快速运算实时地求出运动物体的俯仰角  $\beta$ 。

不过, 由式(1)可知, 滚动角  $\alpha$  与俯仰角  $\beta$  相关, 且俯仰角此时未知。为了获得足够精度的滚动角和俯仰角, 较为理想的方法是采用迭代方法来求取近似解。具体过程如下: 首先假设俯仰角  $\beta$  的初始值  $\beta_0$  为 0, 则由式(1)可推出滚动角的初始值为单轴倾角仪的测量输出值  $\alpha'$ , 进而由式(6)可求取一次迭代的俯仰角  $\beta_1$ ; 将  $\beta_1$  代入式(1)中, 则又可得到一次迭代的滚动角  $\alpha_1$ ; 将  $\alpha_1$  代入式(6)中求取二次迭代的俯仰角  $\beta_2$ 。若两次迭代的俯仰角之差的绝对值小于绝对误差限  $\epsilon$ , 则结束迭代求解, 否则, 继续迭代。整个迭代算法的流程如图 5 所示。

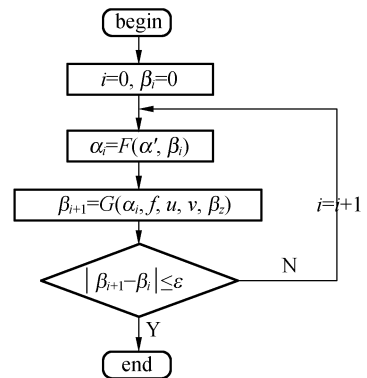


图 5 俯仰角的迭代算法流程图

Fig. 5 Flow chart of iterative algorithm for pitching angle

为了证明迭代算法的收敛性, 首先将式(1)代入式(6)中, 以求得俯仰角的迭代关系式, 如式(7)所示。

$$\beta^{(i+1)} = \varphi(\beta^{(i)}), \quad i=0, 1, \dots, \quad (7)$$

当单轴倾角仪的测量输出值  $\alpha'$ 、准直激光的垂直角  $\beta_z$  以及光斑坐标  $u''$  和  $v''$  的变化范围分别是  $\pm 15^\circ, \pm 5^\circ, \pm 800$  像素和  $\pm 600$  像素时,对俯仰角在  $\pm 8^\circ$  范围内的任意值,可以得到迭代函数  $\phi(\cdot)$  的导数的绝对值远远小于 1,即

$$|\phi'(\beta)| \ll 1, \forall \beta \in [-8^\circ, 8^\circ]. \quad (8)$$

由此证明了迭代法  $\beta^{(i+1)} = \phi(\beta^{(i)})$  对任意初始俯仰角  $\beta^{(0)} \in [-8^\circ, 8^\circ]$  均收敛且收敛速度很快。

### 3 误差分析

由俯仰角的组合测量原理可知,准直激光的垂直角  $\beta_z$ 、CCD 摄像机的焦距  $f$ 、光斑坐标  $u''$  和  $v''$  以及滚动角  $\alpha$  的误差对俯仰角  $\beta$  的测量都有影响。由于滚动角  $\alpha$  是采用单轴倾角仪直接测量的,而且俯仰角的误差对滚动角的影响很小,因此可以认为滚动角的误差仅与单轴倾角仪相关。为了获得组合测量方法的综合误差  $\Delta$ ,首先基于蒙特卡罗法对各因素进行了全局灵敏度分析,结果分别如图 6~图 9 所示。

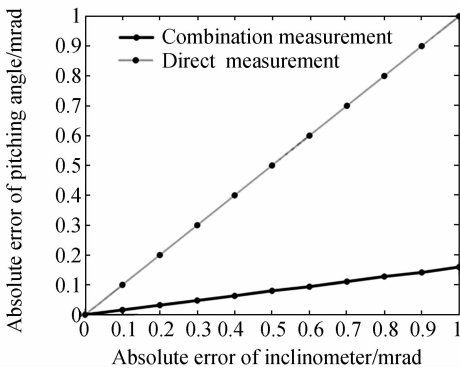


图 6 倾角仪(滚动角的变化范围为  $\pm 15^\circ$ )的灵敏度分析

Fig. 6 Sensitive analysis of inclinometer and rolling angle with range from  $-15^\circ$  to  $15^\circ$

图 6 表明假设倾角仪的测量误差为 1 mrad,当直接用来测量俯仰角时,则俯仰角也会具有 1 mrad 的误差;而采用组合测量方法后,1 mrad 的倾角仪误差最终对俯仰角测量的影响不超过 0.2 mrad。因此,组合测量方法非常有效地减轻了倾角仪的测量误差对俯仰角的影响。

另外,从图 7~9 可以看出,组合测量方法中准直激光的垂直角  $\beta_z$ 、CCD 摄像机的焦距  $f$ 、光

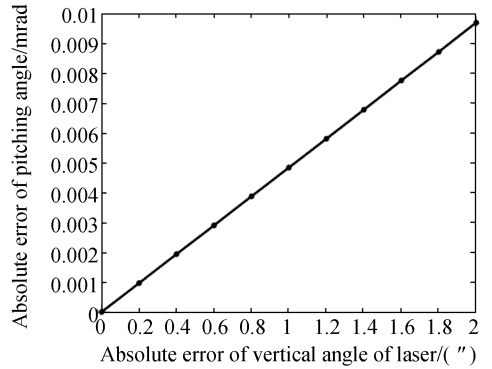


图 7 激光垂直角(变化范围为  $\pm 5^\circ$ )的灵敏度分析  
Fig. 7 Sensitive analysis of laser vertical angle with range from  $-5^\circ$  to  $5^\circ$

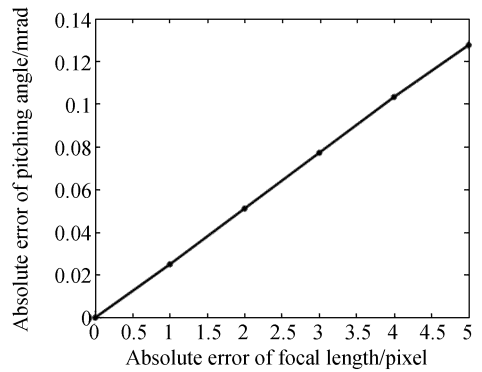


图 8 焦距的灵敏度分析

Fig. 8 Sensitive analysis of focal length

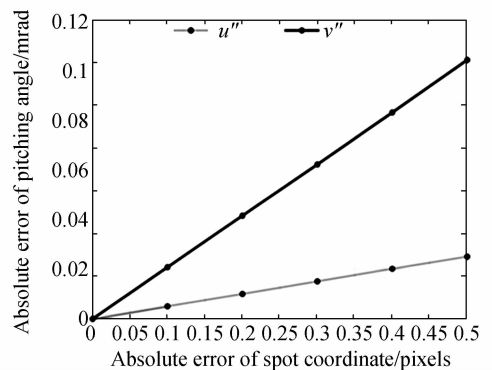


图 9 光斑坐标( $u'', v''$  的变化范围分别为  $\pm 800$  和  $\pm 600$  像素)的灵敏度分析

Fig. 9 Sensitive analysis of light spot coordinates (Variation ranges of  $u''$  and  $v''$  are  $\pm 800$  and  $\pm 600$  pixels, respectively)

斑坐标  $u''$  和  $v''$  的误差对俯仰角测量的影响也很小,而且由于是光学测量,因此长期工作稳定性很高。假设各误差是相互独立的且服从均匀分布,

则通过式(9)对各个误差进行合成,最终能够得到组合测量方法的综合误差不超过 0.3 mrad。

$$\Delta = \sqrt{\sum \delta_i^2}, \quad (9)$$

式(9)中  $\delta_i$  表示各个影响因素在其误差范围内对俯仰角测量造成的最大误差值。

## 4 实验分析

为了进一步验证组合测量方法的可行性和有效性,利用高精度的三轴转台进行了运动物体俯仰角的测量实验,包括采用倾角仪直接测量实验和基于组合测量方法的测量实验。3KTD-565 型三轴转台如图 10 所示,技术参数为:内外框的倾角回转误差  $\pm 3''$ ,中框的倾角回转误差  $\pm 5''$ ,中内框的轴线垂直度  $\pm 5''$ ,中外框的轴线垂直度  $\pm 3''$ ,



图 10 三轴转台 3KTD-565

Fig. 10 3KTD-565 three-axis table

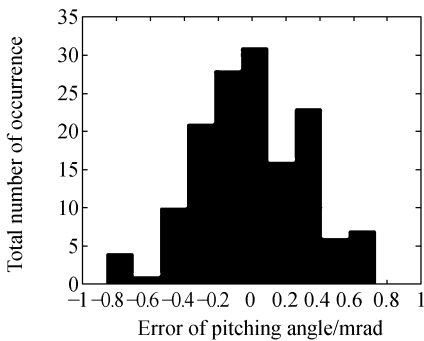


图 11 倾角仪直接测量法的俯仰角误差分布(误差标准差:0.32 mrad)

Fig. 11 Error distribution of pitching angle measured by the inclinometer directly (standard deviation of error: 0.32 mrad)

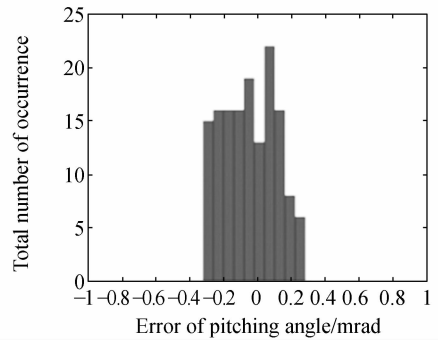


图 12 组合测量法的俯仰角误差分布(误差标准差:0.16 mrad)

Fig. 12 Error distribution of pitching angle measured by combination measurement method (standard deviation of error: 0.16 mrad)

角位置测量精度  $\pm 3''$ 。三轴转台可以使滚动角在  $\pm 15^\circ$ 、俯仰角在  $\pm 8^\circ$  内变化。通过比较测量值与三轴转台的标定角度值,分别得到了如图 11 和图 12 所示的误差分布图。可以看出,与采用倾角仪直接测量法相比,组合测量方法明显提高了俯仰角的测量精度,使得俯仰角在  $\pm 8^\circ$  变化时其误差的绝对值不超过 0.3 mrad,误差标准差也从 0.32 mrad 降低到了 0.16 mrad。

## 5 结论

本文提出了一种基于单轴倾角仪和 CCD 摄像机组合的俯仰角测量方法。通过测量准直激光在 CCD 上形成的光斑坐标并结合滚动角和准直激光的垂直角参数,采用迭代方法可以快速地求出运动物体的俯仰角,同时还可以对滚动角进行进一步校正。虽然滚动角是用单轴倾角仪直接测量的,但基于蒙特卡罗法的误差理论分析已证明倾角仪的测量误差对最终俯仰角测量的影响很小。实验也证明了组合测量方法的精度同倾角仪直接测量法相比从 0.8 mrad 提高到了 0.3 mrad。更为重要的是,组合测量方法融入了光学测量技术,因此抗环境干扰能力强、长期工作稳定性很高,可以满足工程机械施工中自动测量的要求。

## 参考文献:

- [1] KIRKPATRICK S J, DUNCAN D D. Noncontact microstrain measurements in orthodontic wires [J]. *Journal of Biomedical Materials Research*, 1995, 29(11):1437-1442.
- [2] LIU D, WANG F, CEN K F, *et al.*. Noncontact temperature measurement by means of CCD cameras in a participating medium [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(5):422-424.
- [3] TANG W SH, LI Q H, TAN Q CH, *et al.*. A new method of noncontact measurement of the plane parameters [C]. 2009 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 445 *Hoes Lane-P. O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, United States: IEEE Computer Society*, 2009:2554-2559.
- [4] 郝鹏飞, 张新军, 董志国, 等. 基于面阵 CCD 的高精度测量技术及应用 [J]. *天津大学学报*, 2008, 41(12):1443-1447.
- HAO P F, ZHANG X J, DONG ZH G, *et al.*. Area CCD—based high accuracy measurement technology and its application [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(12):1443-1447. (in Chinese)
- [5] 李珺, 姚进, 任违. 天平校准系统中位置姿态非接触式测量与计算方法 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2003, 35(3):90-92.
- LI J, YAO J, REN W. Non-contacted measure to confirm the balance's position in adjustment of balance [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2003, 35(3):90-92. (in Chinese)
- [6] 李慧鹏, 王军, 张军, 等. 一种新型非接触式线径测量系统 [J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4):209-211.
- LI H P, WANG J, ZHANG J, *et al.*. A novel noncontact measurement system for the diameter of wires [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4):209-211. (in Chinese)
- [7] 艾莉莉, 袁峰, 丁振良. 应用线阵 CCD 的空间目标姿态测量系统 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1):161-165.
- AI L L, YUAN F, DING ZH L. An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):161-165. (in Chinese)
- [8] SRIKANTA M, NEIL D, RUSKAUFF G. Global sensitivity analysis techniques for probabilistic ground water modeling [J]. *Ground Water*, 2009, 47(5):730-747.
- [9] STEFANO C, LOVATO T, RATTO M. Global uncertainty and sensitivity analysis of a food-web bioaccumulation model [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2009, 28(4):718-732.
- [10] 邓兆祥, 颜长征. 基于蒙特卡罗法的摩托车车架灵敏度分析 [J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(10):1113-1117.
- DENG ZH X, YAN CH ZH. Sensitivity analysis of a motorcycle frame using the Monte Carlo method [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(10):1113-1117. (in Chinese)
- [11] 于德介, 李睿. Sobol' 法在非线形被动隔振体灵敏度分析中的应用研究 [J]. *振动工程学报*, 2004, 17(2):200-213.
- YU D J, LI R. Application of Sobol' method to sensitivity analysis of a non-linear passive vibration isolators [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2004, 17(2):200-213. (in Chinese)
- [12] 陈刚, 汪玉, 毛为民, 等. 冲击载荷作用下舰艇管路系统全局参数灵敏度分析 [J]. *振动与冲击*, 2006, 26(3):45-48.
- CHEN G, WANG Y, MAO W M, *et al.*. Global parameter sensitivity analysis of shipboard piping systems under shock loads [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 26(3):45-48. (in Chinese)

## 作者简介:



潘明华(1977—),男,湖北武汉人,博士研究生,2005年于华中科技大学获得硕士学位,主要从事机器视觉及光学测量方面的研究。E-mail: pmh24@163.com



文香稳(1985—),男,湖南常德人,硕士研究生,2008年于西北工业大学获得学士学位,主要从事姿态测量及传感器误差补偿的研究。E-mail: wxw5242@163.com

## 导师简介:



朱国力(1966—),男,江苏盐城人,教授,博士生导师,1989年于华中理工大学获得硕士学位,主要从事自动控制、机电一体化等方面的研究。E-mail: glzhu@hust.edu.cn

## ● 下期预告

## 微硅狭缝紫外-可见光谱仪杂散光的产生与抑制

黎海文,郝 鹏,吴一辉

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033)

介绍一种自行研制的基于微硅狭缝的紫外-可见光谱仪。对该光谱仪杂散光的产生原因进行了分析,讨论了光谱仪的关键部件微硅狭缝的直线度、厚度与杂散光之间的关系,并对狭缝直线度产生的杂散光进行实验验证。针对以卤钨灯为光源紫外-可见光谱仪进行测量时,紫外部分能量低,杂散光影响严重的问题,提出一种组合滤光片法,通过在入射狭缝和探测器前增加双重滤光片相合,可平衡紫外-可见范围内各波段的光波强度,抑制紫外波长处杂散光的影响。实验结果表明:采用组合滤光片法抑制后,杂散光降低为抑制前的 23%。