

基于光电准直虚拟扩展成像的姿态角测量系统的误差分析

江 洁 王昊予 张广军

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要 建立了基于光电准直原理的姿态角测量系统,提出一种虚拟扩展成像面技术,应用于测量系统中,对图像传感器成像面进行复用,虚拟扩大系统的测量视场。介绍了系统的主要工作原理,在系统模型下,对可能影响系统测量精度的误差源进行了分析,建立其数学关系,对精度影响因素进行了定量仿真实验。按照仿真结果,对系统设计方案进行了分析验证。结果表明,分析的因素对系统的姿态角测量精度确实存在影响,以分析结果为参考,可以确定减小系统误差和提高测量精度的方法和途径。

关键词 成像;光电准直;虚拟扩展成像;姿态角;误差分析

中图分类号 TM930.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0112002

Error Analysis of Attitude Angle Measuring System Based on Photoelectric Collimation and Virtual Extension Imaging

Jiang Jie Wang Haoyu Zhang Guangjun

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education, School of Instrumental Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract An attitude angle measuring system based on photoelectric collimation and virtual extension imaging is established to enlarge field of view (FOV) of system. The FOV is virtually enlarged through multi-imaging. The main principles of system is introduced, and error sources which may affect measuring precision of system are analyzed based on system model. Experiments on error sources and system measuring precision is simulated under their mathematic relations. Simulation result is used to analyze and verify the system design. The results show that the proposed factors indeed affect system measuring precision. Based on the results, approaches to reduce system error and improve precision can be proposed.

Key words imaging; photoelectric collimation; virtual extension imaging; attitude angle; error analysis

OCIS codes 120.0120; 110.2990; 120.4570

1 引 言

随着光电组合测角技术的发展,基于光电准直原理的姿态角测量系统以其高精度、高可靠性、实现简单、体积小、重量轻和可维护性好等优点在测角领域中得到了广泛的应用^[1~6]。在传统的基于图像传感器(如 CMOS、CCD)的姿态角测量系统中,视场(量程)大小受到传感器成像面和系统焦距的限制,成像面越大,焦距越小,则系统的视场越大^[7]。但是

大像素的图像传感器数量少,且价格非常昂贵。本文应用了虚拟扩展成像技术,可以对图像传感器的成像面进行复用,虚拟扩大系统的测量视场。

对于测量系统来说,测量精度是重要指标,系统中的各种误差源会对系统整体的测量误差产生影响。本文对基于光电准直虚拟扩展成像的姿态角测量系统进行了误差分析,建立了系统模型,确定了系统测量精度的影响因素,并进行了仿真实验,为提高

收稿日期: 2010-03-24; 收到修改稿日期: 2010-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(50805006)资助课题。

作者简介: 江 洁(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事光电测量和光电导航方面的研究。E-mail:jiangjie@buaa.edu.cn

系统的测量精度以及减小测量误差提供参考。

2 系统工作原理

测量系统的工作原理如图 1 所示,以针孔光阑作为光学系统,平行准直入射光通过针孔光阑投射在图像传感器成像面上形成光斑,对于大角度的入射光,经由平面反射镜组构成的虚拟扩展成像装置,可以反射到图像传感器的成像面上形成反射光斑,从而虚拟扩大了可测光线的入射角度,即在相同的硬件条件下扩大了系统的可用视场(量程)。提取投影光斑质心坐标 (X_c, Y_c) ,通过三角几何的方法就可以计算出光线的入射角。判断光斑的正反射模式。对于正射光斑,直接以质心坐标计算姿态角;对于反射光斑,按其反射模式进行坐标扩展,以映射到虚拟扩展成像面上的质心坐标计算姿态角。系统建模时,将坐标原点取在针孔中心 O_m ,假设准直光线入射的矢量方向为 V_1 和 V_2 , V_1 入射得到正射光斑, V_2 经虚拟扩展得到反射光斑。入射光在两轴方向上的入射角度分别是 α, β 。小孔平面与成像平面的距离(系统焦距)是 F 。

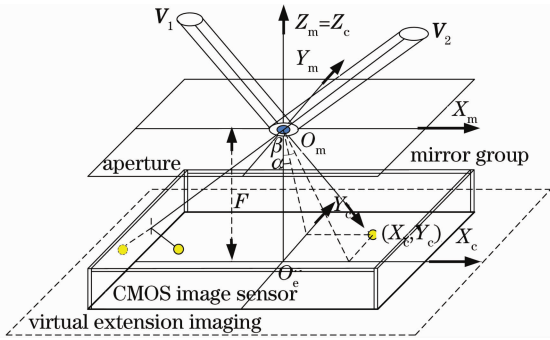


图 1 系统工作原理示意

Fig.1 Principles of system

由投影关系及三角几何,可得到该坐标系下二维姿态角 α, β 的表达式:

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctan(Y_c/F), \\ \beta &= \arctan(X_c/F). \end{aligned} \quad (1)$$

3 系统误差分析及仿真

3.1 光斑质心定位误差

CMOS, CCD 等面阵探测器所获取的图像,已不是原始的连续的目标像点的映射,而是它的一个离散近似。对目标图像质心位置的测量,主要从数字化的图像数据出发,利用图像灰度分布的特性,估计出原连续光斑图像的中心位置。质心算法本身就是用光斑像素区域的几何中心代替光束的能量中

心,这种近似会带来误差^[8,9]。在使用高斯分布对入射光束的能量分布近似时,这种误差可以达到最小。

采用一阶矩质心算法计算光斑图像的中心位置,可以看成是一种对光斑图像灰度值的加权运算。研究表明,按小孔成像原理形成的光斑可以近似认为服从二维高斯分布,如下式所示:

$$I(x, y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma_{\text{PSF}}^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right] \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right], \quad (2)$$

式中 σ_{PSF} 为高斯半径,反映了光斑的大小。分析论证表明,当 σ_{PSF} 为 0.5~0.7 pixel 时,质心定位的均方根(RMS)误差获得最小值,可以达到小于 0.001 pixel 的水平,这时的光斑大小为 3 pixel×3 pixel^[10]。所以 3 pixel×3 pixel 大小的投影光斑可以获得最高的质心定位精度。

对(1)式两边求微分,得到角度计算误差 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 和质心计算误差 $\Delta X_c, \Delta Y_c$ 的关系如下式(3)所示:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \frac{\Delta Y_c}{(1 + \tan^2 \alpha)F}, \\ \Delta\beta &= \frac{\Delta X_c}{(1 + \tan^2 \beta)F}. \end{aligned} \quad (3)$$

以 $\Delta\alpha$ 和质心计算误差 ΔY_c 为例,由(3)式可知,角度计算误差 $\Delta\alpha$ 和质心计算误差 ΔY_c 的相互关系与光线入射角度有关,在不同的入射角度下,根据(3)式的数学关系进行仿真,得到图 2 所示的关系曲线:

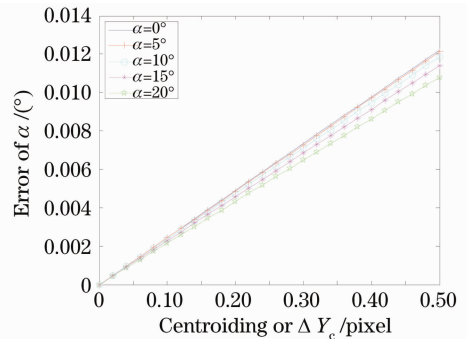


图 2 角度计算误差与质心定位误差关系曲线

Fig.2 Angle calculating error and centroiding positioning error

分析图 2 可知,质心定位的精度会对最后的姿态角计算结果精度有比较明显的影响,如果定位偏离 0.5 pixel,就会带来大约 0.01°的姿态角计算误差。姿态角计算误差随着质心定位误差的增大而增大。另外随着光线入射角的增大,质心定位误差对姿态角计算结果的影响会减小。质心定位误差对 β

角度计算的影响有类似的结果。

3.2 噪声误差

3.2.1 读出噪声

读出噪声是由图像传感器和整个硬件电路系统决定的,是一种恒定噪声,具有时间无关性。通过增强光强度的方法可以提高系统的信噪比,提高测量精度。可以通过控制增大 CMOS 图像传感器的积分时间实现减小系统的读出噪声。

3.2.2 暗电流噪声

暗电流噪声是硬件系统中普遍存在和不可消除的一种噪声,和图像传感器的制作工艺、电源噪声、环境温度及曝光时间等都有关系,且每个像素对暗电流噪声的贡献不同。通常情况下,电源噪声越大则图像噪声越大;环境温度越高,暗电流越大,图像噪声就越大。如果增加积分时间,会增大暗电流噪声。因此减小暗电流噪声和减小读出噪声不可兼得。

3.3 系统安装误差

3.3.1 针孔光阑安装误差

本文基于微机电系统(MEMS)工艺制作高精度的针孔光阑作为整个测量系统的前端光学系统,由于针孔光阑与系统的硬件电路板相分离,所以需

要通过系统的机械壳体固定,实际使用中不可避免的会出现安装误差^[11],如图 3 所示,主要由针孔光阑和 CMOS 成像面的相对位置安装关系引起。图中的各个参数表示如下:

1) 针孔光阑平面坐标原点相对成像平面坐标原点平移,设针孔光阑平面坐标原点在成像平面投影的坐标由 (X_c, Y_c) 变为 (X_0, Y_0) ,如图 3(a) 所示;

2) 针孔光阑平面到成像平面距离不为精确的理论值 F ,设实际值为 F' ,如图 3(a) 所示;

3) 针孔光阑平面相对成像平面在两轴方向倾斜,设倾斜角分别为 α_0, β_0 ,如图 3(b) 所示;

4) 针孔光阑平面相对成像平面旋转,设旋转角为 φ ,如图 3(c) 所示。

考虑上述误差模型的二维入射角表达式变为

$$\alpha = \arctan \left[\frac{(X_c - x_0) \cos \varphi + (Y_c - y_0) \sin \varphi}{F'} \right] + \alpha_0,$$

$$\beta = \arctan \left[\frac{(X_c - x_0) \sin \varphi + (Y_c - y_0) \cos \varphi}{F'} \right] + \beta_0,$$
(4)

式中 $F', x_0, y_0, \alpha_0, \beta_0, \varphi$ 是系统标定得到的内部参数。

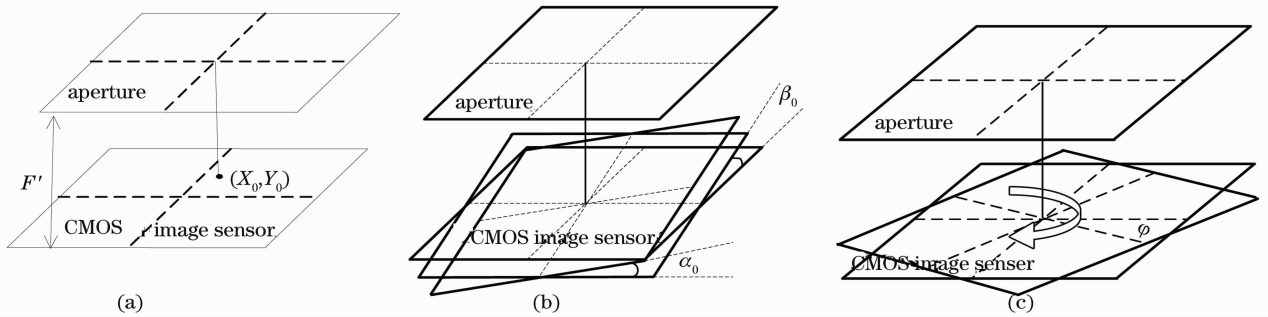


图 3 针孔光阑安装误差

Fig. 3 Optical aperture fixing error

系统的焦距主要被针孔光阑和系统电路板的安装位置关系,以及机械壳体的加工影响。(1)式两端对焦距 F 求微分,可得焦距设置偏差与角度计算的误差关系为

$$\Delta\alpha = \frac{Y_c \Delta F}{(1 + \tan^2 \alpha) F^2} = \frac{(F \tan \alpha) \Delta F}{(1 + \tan^2 \alpha) F^2}$$

$$\Delta\beta = \frac{X_c \Delta F}{(1 + \tan^2 \beta) F^2} = \frac{(F \tan \beta) \Delta F}{(1 + \tan^2 \beta) F^2}. \quad (5)$$

图 4 仿真了不同入射角度下系统焦距偏差与角度计算误差的关系曲线:

由图 4 可知,焦距误差越大,对姿态角计算的影响也越大。同时随着光线入射角度逐渐增大,焦距对姿态角计算的精度影响会加强。如果光线的入射

角度为零,则焦距误差对角度计算无影响。

由(4)式可知,CMOS 在两轴方向上的安装误

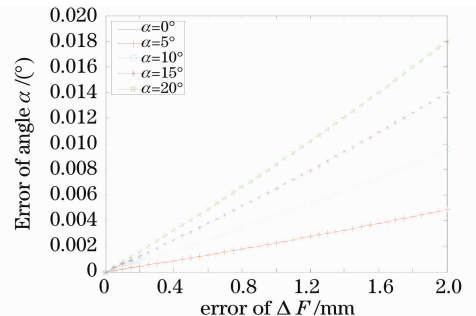


图 4 焦距误差 ΔF 与角度计算误差关系曲线

Fig. 4 Relation between focal length error and angle calculating error

差 α_0 和 β_0 对姿态角计算的影响误差是加的线性关系,安装误差越大,姿态角计算误差越大。

图 5 给出了针孔光阑安装旋转角偏差对质心坐标计算影响的示意图。由图可知,对于成像面上的投影光斑,由于针孔光阑旋转角 φ 而计算得到的质心坐标 (X', Y') 与质心坐标真实值 (X, Y) 之间的关系为

$$\begin{aligned} X' &= \frac{X}{\cos \varphi} + Y' \tan \varphi, \\ Y' &= (Y - X \tan \varphi) \cos \varphi. \end{aligned} \quad (6)$$

将 Y' 带入 X' 表达式,可得:

$$\begin{aligned} \Delta Y &= (Y - X \tan \varphi) \cos \varphi - Y, \\ \Delta X &= \frac{X}{\cos \varphi} + (Y - X \tan \varphi) \cos \varphi \tan \varphi - X. \end{aligned} \quad (7)$$

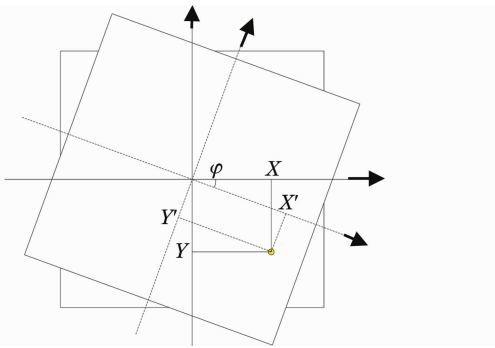


图 5 光阑旋转角 φ 分析

Fig. 5 Analysis of aperture rotation angle φ

根据(7)式的数学关系,图 6 仿真了针孔光阑的安装旋转角 φ 对 X 方向和 Y 方向上的质心计算误差关系曲线,取理想质心坐标 $(X, Y) = (256 \text{ pixel}, 256 \text{ pixel})$,即在图像传感器成像面中部。

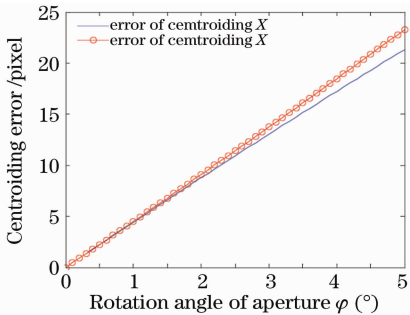


图 6 针孔光阑旋转角 φ 对质心计算误差关系曲线

Fig. 6 Relation between aperture rotation angle versus centroiding calculation error

3.3.2 反射镜组安装误差

作为虚拟扩展成像的主体装置,平面反射镜组的安装误差具体包括平移误差和倾斜误差,如图 7 所示,图中的各个参数表示如下:平面反射镜倾斜误差,以倾角 η 表示;平面反射镜平移误差,以距离 L 表示。

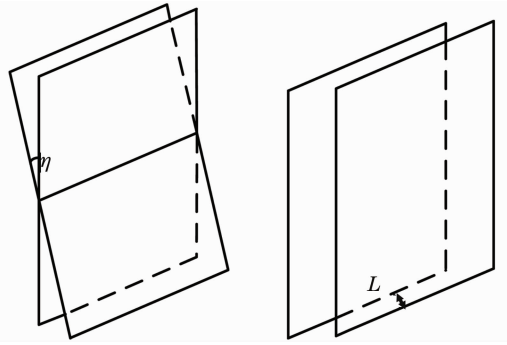


图 7 平面反射镜安装误差

Fig. 7 Mirror fixing error

图 8 对平面反射镜的安装倾斜角 η 对光斑质心计算的影响进行了分析。根据其中各几何参量的数学关系,可以计算出倾角 η 与光斑偏移像素 e_1 之间的函数关系为

$$\begin{aligned} e_1 &= (F - 512 d_{\text{pixel}} \cot \theta) \\ &[\tan(\theta + 2\eta) - \tan \theta] / d_{\text{pixel}}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 d_{pixel} 为 CMOS 图像传感器像素大小,对于本文实际采用的 IBIS5-A 图像传感器来说, $d_{\text{pixel}} = 6.7 \mu\text{m}$ 。 θ 为光线入射角, η 为平面反射镜倾斜角。

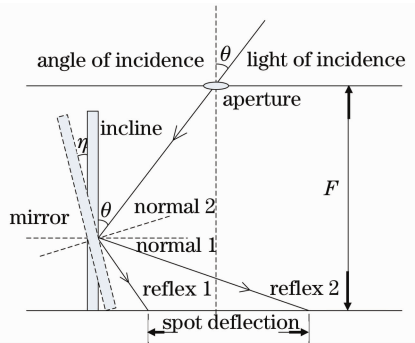


图 8 平面镜倾斜角 η 分析

Fig. 8 Analyses of mirror inclination η

图 9 仿真了平面镜安装的倾斜角度(图 7 中的 η 角)对反射光斑偏移像素的影响关系曲线,固定光线入射角 $\theta = 15^\circ$,接近系统最大视场 $\pm 20^\circ$ 。由图可知,如果平面反射镜倾斜 1° ,就会带来接近 20 pixel 的质心计算偏差,由图 2 可知,这会对姿态角计算引入极大的误差。

图 10 分析了平面反射镜的安装平移距离 L 对系统精度的影响,由于平面反射镜的安装误差,导致入射光线的行进轨迹出现了偏差,经平面镜反射后的光斑位置也会改变。根据图 10 中各几何参量的数学关系,可以计算出平面镜平移距离 L 与光斑偏移像素 e_1 之间的函数关系为

$$e_1 = (L \cot \alpha \tan \alpha + L) / d_{\text{pixel}} = 2L / d_{\text{pixel}}. \quad (9)$$

图 11 仿真了平面镜安装的偏移距离(图 7 中的

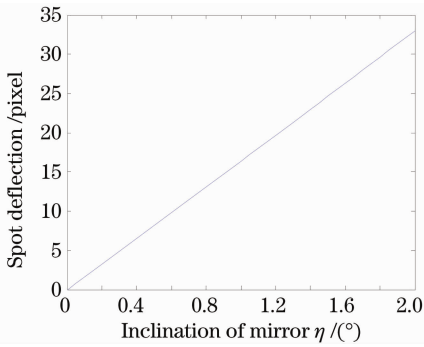


图9 平面反射镜安装倾斜角度与反射光斑偏移像素关系

Fig. 9 Relation between mirror fixing inclination and spot deflection pixels

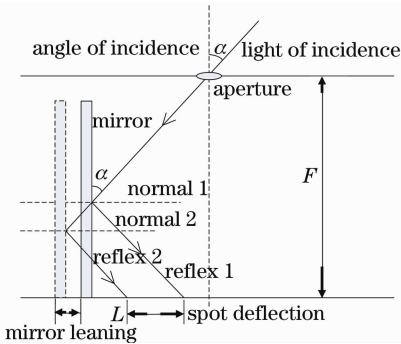


图10 平面镜平移距离分析

Fig. 10 Analyses of mirror translation distance

L)对反射光斑偏移像素的影响关系曲线,可知如果平面反射镜安装时偏移 0.1 mm,就会带来 30 pixel 左右的光斑质心偏移,由图 2 可知,这也会对姿态角计算引入极大的误差。

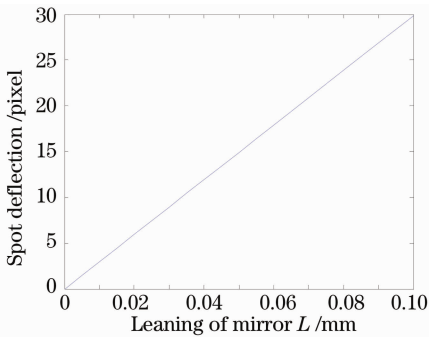


图11 反射镜安装平移距离与反射光斑偏移像素关系

Fig. 11 Mirror translation distance and spot deflection pixels

综合上面几点仿真结果,可以发现在整个测量系统中,机械安装误差是一个比较大的误差源,特别是虚拟扩展装置的安装设计,一定要保证较高的精度,否则在光线被反射虚拟成像的情况下,光斑在

CMOS 成像面上的投影位置会产生极大的偏差,从而影响对光斑的质心定位,继而影响姿态角的计算精度。

4 结 论

介绍了基于光电准直和虚拟扩展成像原理的姿态角测量系统的工作原理,从提高系统测量精度的目的出发,建立了系统工作模型,对测量系统进行了误差分析和仿真,主要分析了光斑质心定位误差、噪声误差、系统安装误差对系统测量精度的影响,并进行了仿真实验,得到了定量数据结果及关系曲线。实验表明,通过改善这些系统环节,可以有效地减小系统测量误差,提高系统测量精度。

参 考 文 献

- 1 Shiguang Li, Changxi Yang, Enyao Zhang. Compact optical roll-angle sensor with large measurement range and high sensitivity[J]. *Op. Lett.*, 2005, **30**(3): 242~244
- 2 Zhao Tingting, Zhao Yong, Zhang Yi. Two-dimensional micro-angular displacement measurement based on fiber arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 874~878
赵婷婷, 赵勇, 张毅. 基于光纤阵列的二维微角位移传感器 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 874~878
- 3 H. M. Shang, S. L. Toh, Y. Fu *et al.*. Measurement of angle of rotation using circular optical grating [C]. *SPIE*, 2001, **4317**: 72~78
- 4 Jiang Jie, Wen Zhiming, Zhang Guangjun *et al.*. High performance complex optical system design for sun sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 344~348
江洁, 温志明, 张广军等. 一种高性能太阳敏感器复合光学系统设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 344~348
- 5 Hoseong Kim, Jinhwan Ko. Precise angle measurement technique for a vertical microstructure on the substrate [C]. *SPIE*, 2001, **4301**: 134~143
- 6 Pan Gaofeng, Zhang Jingxu, Chen Juan. Common path auto-alignment system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1500~1504
潘高峰, 张景旭, 陈娟. 一种共光路自动对准系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1500~1504
- 7 Takamasa Suzuki, Takanori Endo, Osami Sasaki. Two-dimensional small-rotation-angle measurement using an imaging method [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(4): 043604
- 8 Born M, Wolf E. Principle of Optics [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978
M. 波恩, E. 沃尔夫. 光学原理 [M]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社, 1978
- 9 Jia Yunde. Machine Vision [M]. Beijing: Science Press, 2000
贾云得. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- 10 B. R. Hancock, R. C. Stirbl, Thomas J. Cunningham *et al.*. CMOS active pixel sensor specific performance effects on star tracker imager position accuracy [M]. *SPIE*, 2001, **4284**: 43~53
- 11 Fan Qiaoyun, Techniques for Miniature CMOS Sun Sensor [D]. Beijing: Beihang University, 2007
樊巧云. 小型 CMOS 太阳敏感器技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007