# 光电经纬仪动态误差修正方法

闫海霞[1],刘岩俊[2],王东鹤[2]

(1. 吉林大学 电子科学与工程学院,吉林 长春 130021)
2. 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:** 针对光电经纬仪红外相机测量系统动态测量精度低的问题,提出了一种通过修正各分系统之间延时时间从而提高动态测量精度的方法。首先介绍了光电经纬仪红外相机测量系统的组成和测量原理,分析了大地坐标系下物像空间的对应关系,指出了影响光电经纬仪红外相机测量系统的原因是相机内方位元素的准确性和光学畸变校正效果。分析了影响光电经纬仪红外相机测量系统动态测量精度的原因,提出了采用各分系统根据工作参数采用不同延时时间的误差修正方法。实验结果验证了该方法的正确性和准确性,标定结果与精度比对实验结果表明,经过动态测角修正的方位角与高低角测角误差均方根值分别由 27.89"与 17.67"提高到 10.07"与 8.56",该方法有效地提高了动态测量精度,并且对其他光电测量设备具有参考价值。

**关键词:** 光电经纬仪; 动态误差; 测角精度; 红外相机

**中图分类号:** TH761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-3030-06

# Correction method of dynamic error of optoelectronic theodolite

Yan Haixia[1], Liu Yanjun[2], Wang Donghe[2]

(1. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130021, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to resolve the lower precision of optoelectronic theodolite dynamic measure precision, a method which is based on the correction of different delay time between the clock base and other sub-systems was proposed. The measurement theory and shipment of optoelectronic theodolite were introduced, the relationship between the object and the image was analysis. The reason which infects the precision were accuracy of camera inside azimuth element and the adjustment of optical distortion was pointed. And the reasons which effect the optoelectronic theodolite dynamic measurement were analysis, and the different delay time between different sub-system parameter were pointed. The correction and accuracy of the method were verified by test data, the average variance of optoelectronic theodolite dynamic error in horizontal and vertical were improved from 27.89" and 17.67" to 10.07" and 8.56". This method improves the dynamic measure precision of optoelectronic theodolite and is suitable for other optical electronic measurement system.

**Key words:** optoelectronic theodolite; dynamic error; measure precision; infrared camera

**收稿日期:** 2013-08-26; **修订日期:** 2013-10-15

**基金项目:** 中国科学院三期创新项目

**作者简介:** 闫海霞(1977-),女,讲师,博士,主要从事信号处理方面的研究。Email:yanhx@jlu.edu.cn

**通讯作者:** 刘岩俊(1978-),男,副研究员,主要从事高精度光电测量设备、数字图像处理方面的研究。Email:liuyanjun@ciomp.ac.cn

## 0 引 言

在导弹、航天器发射试验过程中,火箭的飞行弹道和卫星轨道等反映试验情况的数据大多数是由无线电和光学外测设备通过测量获得的，这些外测设备的测量精度标志着国内导弹、卫星等航天器试验的测控水平[1-2]。而精度是外测设备的生命和归宿，由于测量数据及精度分析对导弹、卫星等航天器的研制、定型和改进密切相关,因此国内各相关单位对外测设备的精度鉴定工作都十分重视[3-4]。而光电经纬仪是靶场光电测量的主要设备,光电测量设备主要通过角度测量、交会处理完成被测目标空间定位,进一步计算目标的外弹道参数数据。测角误差的大小直接影响定位精度，因此对测角误差的来源、影响和检测方法的研究是光电经纬仪的重要研究内容之一[5-7]。

光电经纬仪的精度标定分为静态测角精度与动态测角精度两部分,动态测角精度是在静态测角精度基础上得出的。文中对影响光电经纬仪动态测量误差的原因进行分析,并提出了基于时间对齐的误差修正方法,经过动态测角修正的方位角与高低角测角误差均方根值分别由 27.89"与 17.67"提高到 10.07"与 8.56",该方法有效地提高了动态测量精度,并且对其他光电测量设备具有参考价值。

## 1 光电经纬仪测量原理

### 1.1 前方交会法测量原理

交会法测量原理如图 1 所示，$(O-XYZ)$为大地坐标系,$OX$ 轴指向大地正北或射向,$OY$ 轴指向天顶,$OZ$ 轴按右手定则确定。两台测量设备在大地坐标系中的坐标分别为 $O_i(X_iY_iZ_i)$、$O_j(X_jY_jZ_j)$,两台测量设备测量目标 $T$ 点的方位角分别为 $A_i$、$A_j$,高低角分别为 $E_i$、$E_j$,$i,j$=1,2 表示分站号[8]。

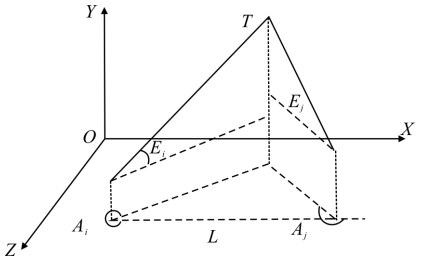


图 1 光电经纬仪交会测量原理

Fig.1 Optoelectronic theodolite measurement theory

根据几何投影关系，利用两个测量分站在大地坐标系下坐标与分站测得目标点的方位角与俯仰角,可以解算出目标点 $T$ 在大地坐标系内的坐标。计算方法如公式(1)所示：

$$\begin{cases} X_{i,j}=X_i+\dfrac{(X_i-X_j)\tan E_j-(Z_i-Z_j)}{\tan A_i-\tan A_j} \\ Y_{i,j}=Y_i+\dfrac{(X_i-X_j)\tan E_j-(Z_i-Z_j)}{\tan A_i-\tan A_j}\sec A_i\tan E_i \\ Z_{i,j}=Z_i+\dfrac{(X_i-X_j)\tan E_j-(Z_i-Z_j)}{\tan A_i-\tan A_j}\tan A_i \end{cases} \tag{1}$$

### 1.2 测量站 AE 角计算方法

根据前方交会法测量原理，测量分站需要提供该站的每个目标的角度值 $A_iE_i$。

图 2 是大地坐标系下脱靶量与编码器的关系，红外相机测量系统的像面坐标系为$(xo_1y)$,目标点在像面上脱靶量为 $\Delta x$、$\Delta y$，编码器提供的角度信息为 $A$、$E$。$\Delta A$ 是像点与物点连线和相机视轴在水平方向投影的夹角[9]。通过公式(2)可以由脱靶量编码器角度计算出测量分站提供的 $A_iE_i$。

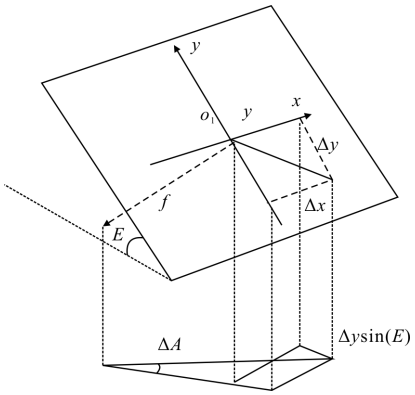


图 2 脱靶量与编码器关系

Fig.2 Relationship between distance and angle

$$\begin{cases} \Delta x=\tan(\Delta A)\cdot(f_1\cos(E)+(\Delta y)\sin(E)) \\ \Delta y\cos(E)=\left(\dfrac{\tan(\Delta E)}{f_1\sin(E)\cos(\Delta A)}\right) \end{cases} \tag{2}$$

## 2 光电经纬仪工作原理

### 2.1 静态精度标定方法

静态测量精度标定过程如下。首先建立静态模型，即经纬仪以静止方式对高低角为 0°的光管进

行拍摄，对全视场情况进行数据采集，以 2°为步长，采用最小二乘法原理，建立方程组，并计算出最小二乘法的所用系数，计算出系统的标定模型。在静态拍摄过程中，采用精度为 0.5″的徕卡经纬仪标定检测架 0°光管与 65°光管之间的水平夹角与高低夹角，标定结果即为真值。被检仪器正、倒镜对水平及 65°光管全视场进行 20 个点静态测量，与标定值进行比较，计算静态测角精度均方根值。其测量误差均方根可以达到 $\delta_{\Delta A}$=7.35″，$\delta_{\Delta E}$=6.82″。

### 2.2 光电经纬仪工作原理

当经纬仪动态工作时，由于以一定的速度与加速度分别按照方位方向与俯仰方向进行运动，编码器采集的方位角 $A$ 和高低角 $E$ 与采集时刻有关。目前的动态精度测量方法是由时统将秒同步分频后同步发送给相机，相机曝光后将产生当前时刻的曝光图像，经过相机缓冲、光纤传输等处理后，在存储系统将时间码、编码器、图像等信息保存到同一帧图像上。根据存储分系统的工作原理，只能将当前帧图像时收到的时间码、编码器信息进行保存，而不是该图像对应的时间码，并且没有考虑曝光时间与编码器角度对齐的情况。从图 3 中可以看出，光电经纬仪红外相机测量系统的工作时序由时统分系统进行控制，分别提供给相机分主控计算机、编码器、相机、伺服控制分系统。工作频率分别为 100、800、100、800 Hz。当不对外触发同步信号进行延时修正时，时统分系统以秒同步信号为基准，分别产生 100、800 Hz 分频数据，发送给各个分系统。

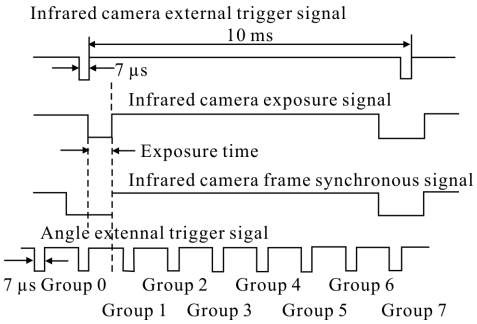


图 3 光电经纬仪工作时序关系

Fig.3 Relationships between optoelectronic theodolite each sub-systems

## 3 动态精度测量实验及精度分析

动态精度测量时，经纬仪的伺服控制参数：速度设置为 20 (°)/s，摆幅设置为 5°。当红外相机以 1 ms 的积分时间工作时，时统分系统以秒同步信号为基准，分频产生 100 Hz 的同步外触发信号给红外相机作为时间基准。同时产生 800 Hz 的同步触发信号给编码器，作为编码器的系统的工作时间基准。当经纬仪以正弦运动方式拍摄标灯时，会在向下运动和向上运动时分别对标灯成像，当不对以上各时间进行调整时，向上运动和向下运动时所产生图像中包含的时间、编码器、脱靶量、合成角度信息见表 1 和表 2。

当经纬仪正向运动时，编码器值采用图 3 中的第 0 组编码器。测得的方位角和高低角静态测量误差的均方根值与平均值分别如下：

$$\delta_{\Delta A}=15.63''\quad \overline{\Delta E}=-41\ 995.73''$$

$$\delta_{\Delta E}=15.45''\quad \overline{\Delta E}=-253.61''$$

当经纬仪正向运动时，编码器值同样采用图 3 中的第 0 组编码器。测得的方位角和高低角静态测量误差的均方根值与平均值分别如下：

**表 1 经纬仪向上运动时各帧图像对应的编码器及脱靶量信息**

**Tab.1 Angle, $\Delta x$ and $\Delta y$ information of each image when photoelectric theodolite moving toward**

| Seq. | Time(h:m:s:ms) | Angle $A$ /(°) | Angle $E$ /(°) | Deviation $\Delta x$ /pixel | Deviation $\Delta y$ /pixel | Result angle $A$ /(°) | Result angle $E$ /(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18:1:4:610 | 12.029 17 | 0.456 944 | 187.72 | 390.74 | 11.662 | −0.067 9 |
| 2 | 18:1:4:620 | 11.829 44 | 0.258 056 | 241.14 | 337.82 | 11.663 | −0.067 5 |
| 3 | 18:1:4:630 | 11.630 28 | 0.058 056 | 296.47 | 285.06 | 11.673 | −0.070 3 |
| 4 | 18:1:4:640 | 11.429 44 | −0.141 94 | 348.29 | 232.43 | 11.668 | −0.065 3 |
| 5 | 18:1:4:650 | 11.232 1 | −0.341 3 | 399.33 | 184.35 | 11.661 | −0.072 7 |

**表 2 经纬仪向下运动时各帧图像对应的编码器及脱靶量信息**

**Tab.2 Angle, Δ*x* and Δ*y* information of each image when photoelectric theodolite moving forward**

| Seq. | Time(h:m:s:ms) | Angle *A* /(°) | Angle *E* /(°) | Deviation Δ*x* /pixel | Deviation Δ*y* /pixel | Result angle *A* /(°) | Result angle *E* /(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18:1:4:960 | 10.830 56 | −0.731 39 | 503.27 | 80.12 | 11.647 02 | −0.074 26 |
| 2 | 18:1:4:970 | 11.028 89 | −0.532 5 | 451.53 | 134.32 | 11.654 19 | −0.074 67 |
| 3 | 18:1:4:980 | 11.228 61 | −0.333 06 | 396.14 | 186.18 | 11.647 19 | −0.070 54 |
| 4 | 18:1:4:990 | 11.428 06 | −0.132 5 | 344.46 | 240.25 | 11.650 75 | −0.074 18 |
| 5 | 18:1:5:000 | 11.628 61 | 0.067 222 | 292.25 | 293.31 | 11.654 51 | −0.074 8 |

$$\delta_{\Delta A}=9.99''\quad \overline{A}=41\,943.73''$$

$$\delta_{\Delta E}=15.45''\quad \overline{\Delta E}=-271.88''$$

如果将以上数据整合为一组数据计算，测得的方位角和高低角静态测量误差的均方根值与平均值分别如下：

$$\delta_{\Delta A}=27.89''\quad \overline{\Delta A}=41\ 971.09''$$

$$\delta_{\Delta E}=17.67''\quad \overline{\Delta E}=-264.63''$$

从整体的方位角和高低角静态测量误差的均方根值与正向运动和返向运动的均方根值可以看到，设备存在较大的系统误差，而设备的随机误差很小，根据误差理论知识，可以对设备的系统误差进行分析，测试，然后消除。

光电经纬仪的时序原则是必须将曝光时刻、脱靶量、编码器三个元素对齐到同一时刻。分析问题产生的原因，在经纬仪以一定的速度、加速度运动过程中，当红外相机的曝光时间为 1 ms 时，需要将红外相机曝光中心与 8 组编码器其中的一个中心对齐，因此理论上需要将编码器的外触发同步向后延时 500 μs，但由于系统设计过程中数据传输、采样时刻以及伺服控制的限制，编码器的外触发同步信号不能修改，可以修改的是相机的外触发信号，因此需要将相机的外触发同步信号向后延时 750 μs，选择第 1 组编码器值。延时设置后的工作时序关系如图 4 所示。时序对齐的公式如下，当红外相机的积分时间为 $T$ 时($T$ 一般为整毫秒)，需要选择的编码器为第 $i$[0:7]组，延时时间设置 $T_{delay}$，那么三者需要满足：

$$T/2+T_{delay}=1.25\ \text{ms}\times i \tag{3}$$

当不采取延时修正时，由于光电经纬仪在正弦引导运动，其速度与加速度一直处于变化状态，因此需要从采集到的数据进行修正处理，需要将 8 组编码器 $A$、$E$ 进行以时间为变量的曲线拟和，并计算出曝光时间为 1 ms 时对应的编码器角度 $A'$、$E'$，将 $A'$、$E'$ 带入公式(2)计算合成角度。该方法从数据处理角度减小系统误差，但由于存在编码器采样延时、曲线拟和精度等问题，不能从根本上解决设备的系统误差。精度测量过程中，一直采用正弦引导方式进行数据采样，速度与加速度及脱靶量关系不能从设计分析，得到数据。因此无法从理论上给出所带来的误差大小，但可以从采集到的数据进行分析处理，同时给出处理方法。

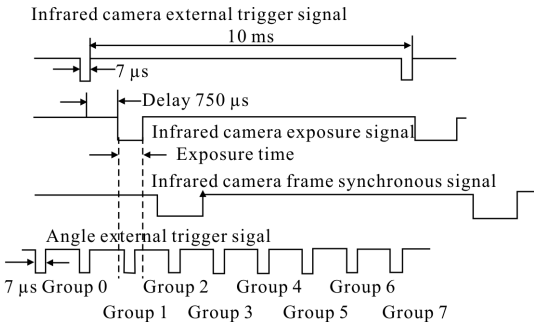


图 4 延时设置后光电经纬仪工作时序关系

Fig.4 Relationships between optoelectronic theodolite each sub- systems after delay time

经过延时设置后，对经纬仪以速度 20 (°)/s 与摆幅 5°的工作参数以标灯为中心进行正弦运动，然后分别计算经纬仪向上运动及向下运动时测得的方位角与高低角信息。测量结果如表 3、表 4 所示。

如果将以上数据整合为一组数据计算，测得的方位角和高低角静态测量误差的均方根值与平均值分别如下：

$$\delta_{\Delta A}=10.07''\quad \overline{\Delta A}=41\ 967.82''$$

表 3 延时修正后经纬仪向上运动时各帧图像对应的编码器及脱靶量信息

**Tab.3 Angle, Δ*x* and Δ*y* information of each image when photoelectric theodolite moving toward after delay time revised**

| Seq. | Time(h:m:s:ms) | Angle *A* /(°) | Angle *E* /(°) | Deviation Δ*x* /pixel | Deviation Δ*y* /pixel | Result angle *A* /(°) | Result angle *E* /(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18:1:54:170 | 10.849 | −0.715 | 500.34 | 84.65 | 11.656 | −0.074 9 |
| 2 | 18:1:54:180 | 11.05 | −0.516 | 445.68 | 138.36 | 11.655 | −0.074 1 |
| 3 | 18:1:54:190 | 11.249 | −0.316 | 392.18 | 191.61 | 11.653 | −0.074 7 |
| 4 | 18:1:54:200 | 11.452 | −0.116 | 339.34 | 243.27 | 11.657 | −0.069 9 |
| 5 | 18:1:54:210 | 11.653 | 0.0847 | 287.54 | 295.84 | 11.662 | −0.068 1 |

表 4 延时修正后经纬仪向下运动时各帧图像对应的编码器及脱靶量信息

**Tab.4 Angle, Δ*x* and Δ*y* information of each image when photoelectric theodolite moving forward after delay time revised**

| Seq. | Time(h:m:s:ms) | Angle *A* /(°) | Angle *E* /(°) | Deviation Δ*x* /pixel | Deviation Δ*y* /pixel | Result angle *A* /(°) | Result angle *E* /(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18:1:53:610 | 12.207 | 0.64 | 138.96 | 444.18 | 11.66 | −0.07 |
| 2 | 18:1:53:620 | 12.006 | 0.441 | 193.94 | 391.14 | 11.663 | −0.071 9 |
| 3 | 18:1:53:630 | 11.807 | 0.24 | 244.78 | 338.22 | 11.655 | −0.073 6 |
| 4 | 18:1:53:640 | 11.607 | 0.041 | 297.81 | 285.76 | 11.655 | −0.073 6 |
| 5 | 18:1:53:650 | 11.408 | −0.16 | 351.42 | 231.83 | 11.658 | −0.069 7 |

$$\delta_{\Delta E}=15.45'' \quad \overline{\Delta E}=-260.21''$$

通过测量数据可以看到，经过延时修正的数据曝光同步的中心时刻与编码器角度对齐后，系统误差可以消除，从而提高光电经纬仪的动态测量精度。

## 4 外场数据比对验证

为了验证动态误差修正结果，在外场采用与高精度已标定设备进行数据比对实验，实验过程中光电经纬仪红外弹道相机测量系统与高精度设备同时对目标弹道轨迹进行测量，测量分站使用经过修正的动态测量方法，红外相机的积分时间使用 1 ms、红外相机延时为 750 μs，选择第 1 组编码器值。测量分站得到的目标方位角与目标高低角经过动态误差修正后，使用公式(1)进行交会处理，将交会计算结果与高精度已标定设备进行数据比对。分别计算两套测量设备大地坐标系下 *X*、*Y*、*Z* 方向的测角误差。外场比对结果如图 5 所示。可以看出，大地坐标系下 *X*、*Y*、*Z* 方向的测角误差平均值分别为 11.32"、10.05"、2.71"。

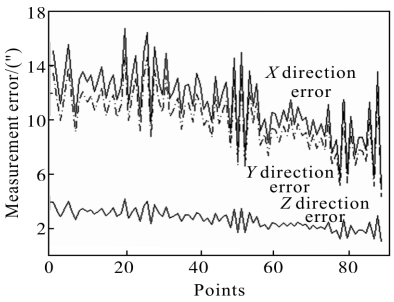


图 5 外场比对实验处理结果

Fig.5 Dynamic calibration test results

## 5 结 论

针对光电经纬仪红外相机测量系统动态测量精度低的问题，提出了一种各系统之间延时修正的精度提高方法。针对不同的曝光时间采用的红外相机外触发延时时间，并且选择不同的组的编码器值，该方法消除了在运动过程中由于延时导致的系统误差。经过动态测角修正的方位角与高低角测角误差

均方根值分别由 27.89"与 17.67"提高到 10.07"与 8.56"。动态比对实验结果表明,与高精度标定设备在大地坐标系下 $X$、$Y$、$Z$ 方向测角误差平均值分别为 11.32"、10.05"、2.71"。

## 参考文献:


[1] Li Zeng, Wu Zhiyong, Tong Gang, et al. Pointing error correction for vehicular platform theodolite [J]. ***Opt and Precision Eng***, 2010, 18(4): 921-927. (in Chinese)
李增, 吴志勇, 佟刚, 等. 车载经纬仪的静态指向误差补偿[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(4): 921-927.

[2] Liu Yanjun, Wang Yongning, He Xin, et al. Research of track recognition method for multiple targets [J]. ***Opt and Precision Eng***, 2008, 16(8): 1478-1482. (in Chinese)
刘岩俊, 王永宁, 何昕, 等. 多目标轨迹分离方法研究[J]. 光学 精密工程, 2008,16(8):1478-1482.

[3] Han Guangyu, Cao Lihua, Han Guangzhao. Cause of varying of theodolite orientation error and its solution [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(3): 699-702. (in Chinese)
韩光宇, 曹立华, 韩光照. 车经纬仪定向误差变化的原因及解决方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 699-702.

[4] Wang Tao, Tang Jie, Song Liwei. Correction of the measuring error of vehicular photoelectric theodolite [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41 (5): 1335-1338. (In Chinese)
王涛, 唐杰, 宋立维. 车载光电经纬仪的测量误差修正[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1335-1338.

[5] Li Manliang, Wu Qinzhang. CCD exposure center measuring system for photoelectric theodolite [J]. ***Opt and Precision Eng***, 2013, 21(5): 1304-1311. (in Chinese)
李满良, 吴钦章. 光电经纬仪 CCD 曝光中心测量系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(5): 1304-1311.

[6] Wang Yifan. Alignment and detecting of photoelectric theodolite system through utilizing interferometer [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42 (5): 1275-1279. (in Chinese)
王一凡. 应用干涉仪对经纬仪光学系统主镜的装调和检测[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1275-1279.

[7] Li Lingyin, Wang Yifan. Error analysis for varifocal optical system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41 (5): 1329-1334. (in Chinese)
李零印, 王一凡. 变焦系统误差分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1329-1334.

[8] Yan Haixia, Liu Yanjun. Method of coplanar multiple targets intersection and error analysis of measurement [J]. ***Opto-Electronic Engineering***, 2008, 35(8): 15-19. (in Chinese)
闫海霞,刘岩俊. 共面多目标交会方法及误差分析[J]. 光电工程, 2008, 35(8): 15-19.

[9] Li Yimin, Liu Yanjun, He Xin, et al. Research of calibration method for high precision CCD butting cameras [J]. ***Semiconductor Optoelectronics***, 2008, 29 (10): 799-802. (in Chinese)
李益民, 刘岩俊, 何昕, 等. 高精度 CCD 拼接相机标定方法研究[J]. 半导体光电, 2008, 29(10): 799-802.