

时间延迟积分 CCD 线阵方向的调整方法

邢 辉

(北京空间机电研究所, 北京 100190)

摘要 时间延迟积分(TDI)CCD 是一种类似面阵结构的线阵输出 CCD, 由于 TDI CCD 光电荷转移具有一定的方向性, TDI CCD 在安装时其积分方向必须与地物在像面上的像移方向一致。给出了经纬仪测量原理, 建立经纬仪测量坐标系。分析了对称视场和不对称视场 TDI CCD 线阵水平的测量原理和调整方法, 推导了 TDI CCD 线阵方向的计算公式。给出的实例表明: TDI CCD 线阵水平的测量与计算方法合理可行。

关键词 探测器; 时间延迟积分 CCD; 线阵方向; 不对称视场

中图分类号 V447+.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0912006

Method of Adjusting the Line Array Direction of the Time Delay Integration CCD

Xing Hui

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100190, China)

Abstract Time delay integration (TDI) CCD is a kind of CCD with frame structure and linear output, and its charge transfer has certain directivity. Therefore, CCD integral direction and TDI imagery heading must maintain the same. The measuring principle of the theodolite is given, and then the measuring coordinate system is established. Measuring principle and adjusting method are analyzed for both symmetrical and unsymmetrical field TDI CCD. The formula to calculate the linear array direction is also deduced. The example given at the end indicates the measuring and calculating method is feasible.

Key words detectors; time delay integration CCD; linear array direction; unsymmetrical field

OCIS codes 040.1520; 080.1753; 120.0280; 120.4630; 220.4840

1 引 言

时间延迟积分(TDI)CCD 是一种类似面阵结构的线阵输出 CCD, 具有多重积分功能, 在低照度下具有较好的成像性能, 且灵敏度高、信噪比高、结构紧凑, 已经被广泛地应用于航空航天以及测量领域。

由于 TDI CCD 光电荷转移具有一定的方向性, TDI CCD 在安装时其积分方向必须与地物在像面上的像移方向一致^[1-2]。航天相机完成光学装调和系统测试后, 再进行焦面安装, 完成焦面安装后需要确定 TDI CCD 的线阵方向。将 TDI CCD 线阵方向通过安装在相机上的外基准立方镜坐标系过渡到卫星坐标系下, 从而得到卫星飞行方向与 TDI CCD 积分方向的关系, 进而对相机进行调整, 直至 TDI

CCD 的积分方向与地物在像面上的像移方向相同。

对称视场 TDI CCD 线阵水平调整比较简单, 只要 TDI CCD 两端在经纬中读数的竖直角相等即可。本文对不对称视场 TDI CCD 线阵水平计算公式进行了详细的推导, 给出了调整方法。

2 原理分析

2.1 经纬仪测量原理

图 1 给出了经纬仪的测量原理。如图 1(a)所示, 当经纬仪以 α 的竖直角绕竖轴旋转 360° , 经纬仪瞄准方向在空间内的运动轨迹为圆锥面, 圆锥面从无限小延伸到无限远, 当然受经纬仪光学系统设计的局限, 实际上经纬仪只能瞄准工作距离 (Leica

收稿日期: 2013-04-26; 收到修改稿日期: 2013-05-08

作者简介: 邢 辉(1979—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光学装调与测试等方面的研究。E-mail: xinghui322@126.com

T3000 工作距离为距经纬仪镜头 510 mm~+∞) 以外的目标。用竖直平面剖切图 1(a)中的圆锥面, 交线为弧线 \widehat{ABC} , 如图 1(b)所示; 图 1(b)中曲线上各点对经纬仪的竖直角均为 α , 显然线段 \overline{AB} 是水平的。用包含直线 \overline{AB} 的水平面剖切图 1(a)中圆锥

面, 交线为圆周, 如图 1(c)所示; 圆周上各点对经纬仪的竖直角均为 α , 并且线段 \overline{AB} 上其他各点对经纬仪的竖直角均小于 α ^[3]。

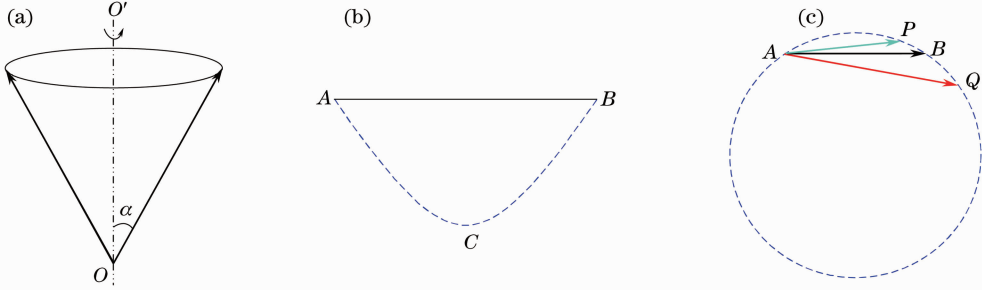


图 1 经纬仪测量原理。(a)经纬仪视轴在空间转过的圆锥面;(b)经纬仪视轴在竖面内的投影;(c)经纬仪视轴在水平面内的投影

Fig. 1 Measuring principle of the theodolite. (a) Taper formed by the boresight of the theodolite; (b) moving trace in the vertical plane; (c) moving trace in the horizontal plane

2.2 建立测量坐标系

以经纬仪的 $(0^\circ, 90^\circ)$, $(270^\circ, 90^\circ)$ 方向分别为 +Y 和 +Z 轴建立右手正交坐标系, 称为测量坐标系, 记为 Σ_0 。坐标系 Σ_0 的 X 轴正方向竖直向上, 此时 Y 轴正方向为经纬仪的零位。假设经纬仪自准空间某方向 P, 对应的水平角和竖直角读数分别为 H 和 V, 如图 2 所示, P 点的空间向量分量在测量坐标系 Σ_0 中表示为^[4]

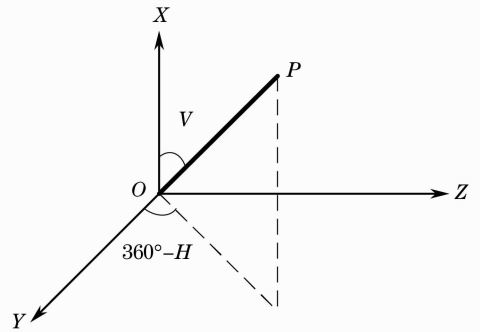


图 2 建立测量坐标系 Σ_0

Fig. 2 Establishing the measuring coordinate system Σ_0
 $P_1P_2P_{22}P_{11}$ 与坐标系 Σ_0 的坐标平面 OXZ 平行, 点 P_{00} 、 P_{11} 和 P_{22} 分别为点 P_0 、 P_1 和 P_2 在水平面 YOZ

$$\begin{cases} x = \cos V \\ y = \sin V \cos H \\ z = -\sin V \sin H \end{cases} \quad (1)$$

2.3 经纬视轴投影曲线方程

如图 3 所示, 线段 $\overline{P_1P_2}$ 所在的竖直平面

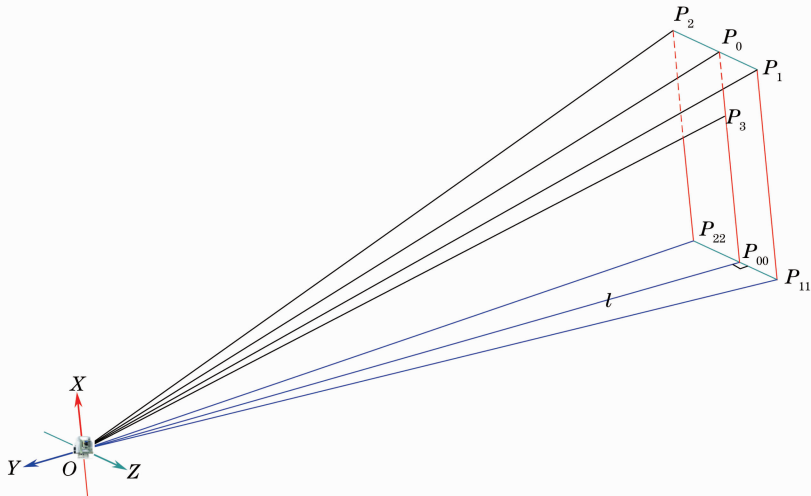


图 3 测试示意图

Fig. 3 Measuring sketch map

内的投影, 平面 $P_1P_2P_{22}P_{11}$ 与经纬仪的水平距离 $\overline{OP_{00}}$ 为 l 。经纬仪以 α 的竖直角测量平面 $P_1P_2P_{22}P_{11}$ 上的点, 经纬仪视轴方向运动轨迹在 XOZ 平面内的投影曲线方程可表示为^[5]

$$\begin{cases} x = l \cot \alpha / \cos \theta \\ z = l \tan \theta \end{cases}, \quad (2)$$

式中 θ 为经纬仪相对于 $\overline{OP_{00}}$ 转过的水平角度, 顺时针为正, 逆时针为负。

3 TDI CCD 线阵水平计算和调整方法

TDI CCD 相机线阵水平调整时通常将相机放置在水平旋转平台上, 用克拉灯照亮 TDI CCD 焦平面。将经纬仪调焦到无限远, 并通过相机瞄到 TDI CCD 整个焦平面。

3.1 对称视场 TDI CCD 线阵水平调整

如图 4 所示, CD 代表相机镜头, A, B 分别为 TDI CCD 的两端。TDI CCD 相机的视轴可以用焦平面上 TDI CCD 中心与相机光学系统孔径光阑中心的连线 $\overline{OO'}$ 表示, 视轴 $\overline{OO'}$ 垂直于 TDI CCD 的焦平面且平分连线 \overline{CE} 与连线 \overline{DE} 的夹角^[6]。

由几何光学原理可知, 焦平面上任一点发出的光经光学系统后都变为平行光, 且平行于发射点与光学系统中心 O 的连线。在实际测量中, TDI CCD 中心 O' 与光学系统中心 O 并无实际标志, 无法实际观测。因此可以在 CDE 区域内任意一点如 T 点观测 TDI CCD 两端点 A, B 在无穷远处的像点, 则视轴方向与连线 \overline{MT} 和连线 \overline{NT} 的角平分线平行。

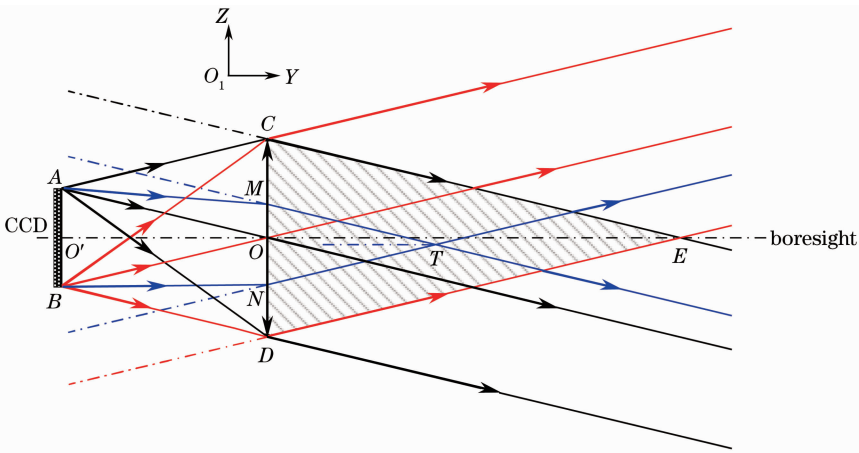


图 4 对称视场线阵方向测量

Fig. 4 Measurement of symmetrical field

在 CDE 区域内任意一点架设经纬仪, 设当观测 A 点像点时得到经纬仪水平角和俯仰角分别为 (H_A, V_A) , 观测 B 点像点时得到的角度为 (H_B, V_B) , 调整相机直至 A, B 两点俯仰角在经纬仪中的

读数相同, 即 $V_A = V_B$, 此时 TDI CCD 线阵水平。

3.2 不对称视场 TDI CCD 线阵水平调整

不对称视场测量如图 5 所示, $C'D'$ 代表相机镜头, A', B' 分别为 TDI CCD 的两端。由 3.1 节可知,

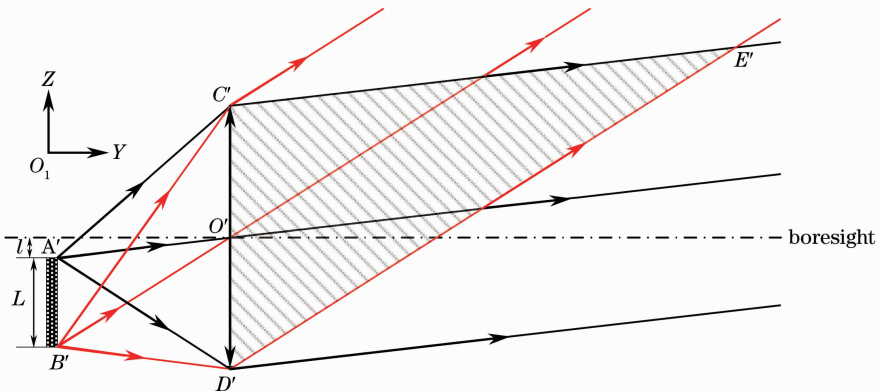


图 5 不对称视场线阵方向测量

Fig. 5 Measurement of unsymmetrical field

测试相机的视轴方向可以将经纬仪放在 $C'D'E'$ 区域内的任意一点,假设经纬仪位于 O 点(实际是不可能的,在这里只是一种等效),由 2.1 节可知 A' 、 B' 两点在经纬仪中的俯仰角是不相同的。假设相机的焦距为 f' , 将(2)式写成

$$\begin{cases} x = f' \cot \alpha / \cos \theta \\ z = f' \tan \theta \end{cases} \quad (3)$$

假设 TDI CCD 的长度为 L , TDI CCD 边缘到相机视轴的距离为 ℓ , TDI CCD 两端点 A' 、 B' 在经纬仪中的读数分别为 $(H_{A'}, V_{A'})$ 、 $(H_{B'}, V_{B'})$ 。根据(3)式得到

$$\begin{cases} x_{A'} = f' \cot V_{A'} / \cos H_{A'} \\ z_{A'} = f' \tan H_{A'} \\ z_{A'} = -l \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_{B'} = f' \cot V_{B'} / \cos H_{B'} \\ z_{B'} = f' \tan H_{B'} \\ z_{B'} = -(l+L) \end{cases}. \quad (5)$$

TDI CCD 线阵水平时,两端点 A' 、 B' 在测量坐标系

中纵坐标值应该相等,即

$$x_{A'} = x_{B'}. \quad (6)$$

由(4)~(6)式求得

$$V_{B'} = \arccot \left[\frac{\sqrt{l^2 + f'^2}}{\sqrt{(l+L)^2 + f'^2}} \cot V_{A'} \right], \quad (7)$$

式中 l 和 L 是已知的,相机的焦距 f' 是可测的,因此只要 A' 点在经纬仪中的竖直角 $V_{A'}$ 确定以后, B' 点在经纬仪中的竖直角 $V_{B'}$ 可以通过(7)式求得。调整相机的俯仰和旋转,直至 TDI CCD 两端点 A' 、 B' 在经纬仪中竖直角满足(7)式,则 TDI CCD 的线阵方向在水平面内。

3.3 对称视场 TDI CCD 线阵方向的计算

根据(1)式可求得图 4 中 TDI CCD 两个端点在经纬仪中单位矢量的方向矢量

$$\begin{cases} \mathbf{A} = (\cos V_A, \sin V_A \cos H_A, -\sin V_A \sin H_A) \\ \mathbf{B} = (\cos V_B, \sin V_B \cos H_B, -\sin V_B \sin H_B) \end{cases}. \quad (8)$$

TDI CCD 的线阵方向可以通过(9)式求得

$$\mathbf{AB} = \mathbf{B} - \mathbf{A} = (\cos V_B - \cos V_A, \sin V_B \cos H_B - \sin V_A \cos H_A, \sin V_A \sin H_A - \sin V_B \sin H_B). \quad (9)$$

将(9)式归一化,得到 TDI CCD 线阵方向在经纬坐标系中的单位矢量

$$\begin{cases} (\mathbf{AB})_1 = (x_1, y_1, z_1) \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 = 1 \end{cases}, \quad (10)$$

x_1 、 y_1 和 z_1 分别为归一化向量 $(\mathbf{AB})_1$ 在经纬坐标系 Σ_0 中的三个坐标值。

3.4 不对称视场 TDI CCD 线阵方向的计算

根据(1)式可求得图 5 中 TDI CCD 两个端点在经纬仪中单位矢量的方向矢量

$$\begin{cases} \mathbf{A}' = (\cos V_{A'}, \sin V_{A'} \cos H_{A'}, -\sin V_{A'} \sin H_{A'}) \\ \mathbf{B}' = (\cos V_{B'}, \sin V_{B'} \cos H_{B'}, -\sin V_{B'} \sin H_{B'}) \end{cases}. \quad (11)$$

在 $\Delta O'A'B'$ 中两个边可以由下式求得:

$$\begin{cases} |\mathbf{O'A}'| = \sqrt{(f')^2 + l^2} \\ |\mathbf{O'B}'| = \sqrt{(f')^2 + (l+L)^2} \end{cases}. \quad (12)$$

因此不对称视场 TDI CCD 的线阵方向可以通过(13)式求得

$$\mathbf{A'B}' = \mathbf{O'B}' - \mathbf{O'A}' = |\mathbf{O'B}'| \mathbf{B}' - |\mathbf{O'A}'| \mathbf{A}'. \quad (13)$$

将(13)式归一化,得到 TDI CCD 线阵方向在经纬坐标系中的单位矢量

$$\begin{cases} (\mathbf{A'B}')_2 = (x_2, y_2, z_2) \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 = 1 \end{cases}, \quad (14)$$

x_2 、 y_2 和 z_2 分别为归一化向量 $(\mathbf{A'B}')_2$ 在经纬坐标系 Σ_0 中的三个坐标值。

4 实验室测量

根据第 2 节和第 3 节给出的原理分析和公式推导,结合一个实例,给出某遥感相机 TDI CCD 线阵方向和视轴方向的数据处理过程,并根据结果对相机进行调整。

4.1 视轴方向

如图 6 所示,某遥感相机线阵 TDI CCD 左上角、左下角、右上角和右下角四个点在经纬仪中的空间角分别为 S_1 (356.99050, 96.14980)、 S_2 (356.990010, 96.181330)、 S_3 (362.781330, 96.149180) 和 S_4 (362.781480, 96.181780),根据(1)式,四点在经纬仪坐标系 Σ_0 下的单位矢量分别为

$$\begin{cases} \mathbf{S}_1 = (-0.10713, 0.99287, 0.05220) \\ \mathbf{S}_2 = (-0.10767, 0.99281, 0.05220) \\ \mathbf{S}_3 = (-0.10712, 0.99308, -0.04824) \\ \mathbf{S}_4 = (-0.10768, 0.99301, -0.04824) \end{cases}. \quad (15)$$

设 TDI CCD 左侧中点在经纬仪坐标系 Σ_0 下的

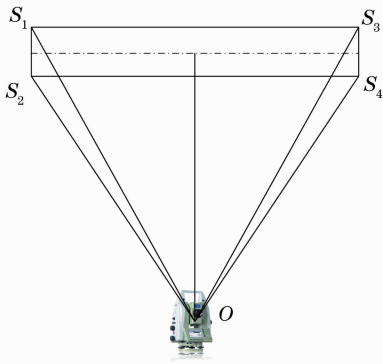


图 6 经纬仪空间角测量

Fig. 6 Spatial angle measurement in the theodolite coordinate frame

矢量为 S_{12} , CD 右侧中点在经纬仪坐标系 Σ_0 下的矢量为 S_{34} , 则 S_{12} 和 S_{34} 可以分别表示为^[7-16]

$$\begin{cases} S_{12} = S_1 + S_2 = (-0.21480, 1.98569, 0.10440) \\ S_{34} = S_3 + S_4 = (-0.21480, 1.98609, -0.09649) \end{cases} \quad (16)$$

将矢量 S_{12} 、 S_{34} 归一化得

$$\begin{cases} S_l = (-0.10740, 0.99284, 0.05220) \\ S_r = (-0.10740, 0.99304, -0.04824) \end{cases} \quad (17)$$

则视轴方向矢量为

$$S_z = S_l + S_r = (-0.21480, 1.98589, 0.00396). \quad (18)$$

由(18)式可以得到视轴归一化的单位矢量

$$S'_z = (0.10754, -0.99420, -0.00198). \quad (19)$$

4.2 线阵方向

线阵方向可以由(13)式求得:

$$S_l = S_r - S_l = (0, 0.00020, -0.10045). \quad (20)$$

由此可得到线阵方向归一化的单位矢量

$$S'_L = (0.000015, 0.001994, -0.999998). \quad (21)$$

将 TDI CCD 线阵方向 S'_L 通过安装在相机上的外基准立方镜坐标系过渡到卫星坐标系下, 从而得到卫星飞行方向与 TDI CCD 积分方向的关系, 如果 TDI CCD 的积分方向与地物在像面上的像移方向不一致, 则调整相机的俯仰和旋转, 直至 TDI CCD 的积分方向与地物在像面上的像移方向满足设计要求。

通过上面的计算过程可以看出, 利用文中给出的计算公式可以方便地求得 TDI CCD 的视轴方向和线阵方向, 进而对相机进行调整直至 TDI CCD 的积分方向与地物在像面上的像移方向一致。对于不

对称视场的航天相机, 可以采用 3.2 节和 3.4 节给出的方法对 TDI CCD 线阵方向进行调整。

5 结 论

利用经纬仪建立测量坐标系, 给出了对称视场航天遥感相机 TDI CCD 线阵水平调整方法, 对不对称视场 TDI CCD 线阵水平调整计算公式进行了推导。给出的测试实例表明, 文中给出的测量和计算方法合理可行, 能够根据计算数据快速方便地对 TDI CCD 的线阵方向进行调整。

参 考 文 献

- 1 Tian Haiying, Hui Shouwen, Li Youyi, *et al.*. Estimation of TDI direction of CCD sensor in aerial camera by graphing method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11): 1984-1988. 田海英, 惠守文, 李友一, 等. 用作图法判定航空相机 TDI CCD 积分方向[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1984-1988.
- 2 Lu Jianrong, Liu Rongli, Yu Ran, *et al.*. Dynamic imaging experiment based on TDI CCD [J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2012, 31(2): 146-149. 陆建荣, 刘荣黎, 于 苒, 等. 基于 TDI CCD 的动态成像实验 [J]. *北京生物医学工程*, 2012, 31(2): 146-149.
- 3 Xing Hui, Jiao Wenchun, Wang Yun. Method to elicit the boresight of infrared cryogenic camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0112008. 邢 辉, 焦文春, 王 昀. 红外低温相机视轴引出方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0112008.
- 4 H Xing, S Mu, J Chen. Correction of calculation method for boresight on aerial remote sensing camera [C]. *SPIE*, 2012, 8417: 84173T.
- 5 Yang Zaihua, Sun Gang, Liu Jianxin. Measurement of orientation of optic axis of space camera with theodolite [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(1): 92-94. 杨再华, 孙 刚, 刘建新. 采用经纬仪测量航天相机视轴的方法分析[J]. *航天器环境工程*, 2010, 27(1): 92-94.
- 6 Shen Zhaoxin, Chen Xiaohui. A technology to get coordinate-system of cube-prism in electron-theodolite surveying system [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2006, 26(4): 73-75. 沈兆欣, 陈晓辉. 电子经纬仪测量系统中立方镜坐标系建立技术探讨[J]. *宇航计测技术*, 2006, 26(4): 73-75.
- 7 J Troll, P Thompson, D Humm. Boresight and gimbal axis alignment for the CRISM instrument [C]. *SPIE*, 2005, 5877: 58770A.
- 8 A W Domanski, D Budaszewski, P Poziemski, *et al.*. Method of optical axis determination in crystals by use of light depolarization measurements [C]. *SPIE*, 2007, 6616: 66161V.
- 9 Liu Yong, Chen Xiaohui, Yin Qing, *et al.*. Applications of three-dimension coordinate transform in space device's geometry measurement [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2008, 37(s): 147-150. 刘 勇, 陈晓辉, 殷 晴, 等. 三维坐标变换在航天器机械测试中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(s): 147-150.
- 10 Wu Guodong, Song Dan. Calibration of mapping camera and cubic prism coordinate system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11): 1727-1730. 吴国栋, 宋 丹. 测绘相机坐标系与立方棱镜转换矩阵的标定 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1727-1730.
- 11 Yang Zhen, Li Guangyun, Huang Guiping, *et al.*. Research on

- attitude measurement method of cubic prism based on autocollimation [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2010, 30(2): 14–29.
- 杨 振, 李广云, 黄桂平, 等. 基于自准直的立方棱镜姿态测量方法研究[J]. *宇航计测技术*, 2010, 30(2): 14–29.
- 12 Gai Pengfei. Autocollimation method of theodolite or total station [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2010, 27(3): 196–199.
- 盖鹏飞. 经纬仪/全站仪自准直方法[J]. *测绘科学技术学报*, 2010, 27(3): 196–199.
- 13 Liu Manlin, Hao Bin, Xiong Rensheng, *et al.*. Visible light measurement television system design and sight line axial precision analysis [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, 23(6): 49–59.
- 刘满林, 郝 斌, 熊仁生, 等. 可见光测量电视系统设计及视轴精度分析[J]. *光电技术应用*, 2008, 23(6): 49–59.
- 14 Zhang Man, Li Tao, Liu Jianxin. A new approach for precision measurements for a satellite under different pressure conditions [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, 23(3): 165–174.
- 张 满, 李 涛, 刘建新. 某卫星不同受力环境下精度测试方法的新思路[J]. *航天器环境工程*, 2006, 23(3): 165–174.
- 15 Chen Jihua, Huang Jianbo, Mu Aiguo, *et al.*. A novel of autocollimation by theodolite [J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006, 23(5): 338–344.
- 陈继华, 黄剑波, 牟爱国, 等. 一种新的经纬仪自准直方法[J]. *测绘科学技术学报*, 2006, 23(5): 338–344.
- 16 Niu Lin, Chen Jianping, Tian Yi. The optimal of common points in three dimension coordinate transformation [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2007, (4): 9–11.
- 牛 琳, 陈建平, 田 疑. 三维坐标转化的公共点选择方法[J]. *北京测绘*, 2007, (4): 9–11.

栏目编辑: 何卓铭