

文章编号 1004-924X(2007)07-1070-07

# ICF 靶场坐标系的建立及其监测方法

刘炳国, 官娜, 刘国栋, 庄志涛, 浦昭邦

(哈尔滨工业大学 自动化测试及控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**提出了一种新的惯性约束聚变(ICF)靶场坐标系建立及传递的方法并设计了一种高精度光学标准靶。研制了三台光学视觉监测仪,介绍了监测仪的工作原理及光学系统设计。最后,介绍了标定方法,进行了实验并对试验结果做了分析。分析表明,靶场坐标系监测系统的综合精度为 $\pm 3.28 \mu\text{m}$ 。结果指出,该坐标系建立及传递的方法简单可行,监测系统精度较高,可以满足靶场系统对试验靶的引导要求。

**关键词:**惯性约束聚变;靶场坐标系;坐标变换;视觉测量;自准直

**中图分类号:**TL632 **文献标识码:**A

## Building method of ICF chamber center reference system and its monitoring

LIU Bing-guo, GONG Na, LIU Guo-dong, ZHUANG Zhi-tao, PU Zhao-bang

(Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A new method for building and transferring chamber center reference system for the target of Inertial Confinement Fusion(ICF) was put forward, and three sets of optical vision monitor instruments with autocollimating and microscope functions were designed and investigated. And then, the working principle and optic design were presented. Finally, the calibration method and testing results were given. The analysis results indicate that the precision of the monitoring system is above  $\pm 3.28 \mu\text{m}$ . Experimental results prove that the method of building and transferring coordinate reference system are easy to carry out and keep a high accuracy. It can satisfy the system requirements of leading physical-test target to the center of target chamber.

**Key words:** ICF; chamber center reference system; coordinate transfer; vision measurement; autocollimating

## 1 引言

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF),是实现可控热核聚变能源的主要途径之

一,研究的目的是在 21 世纪实现干净的聚变能源,同时又可作国防、基础研究等重要应用。自 1964 年我国科学家王淦昌先生在国际上独立提出激光驱动聚变的建议之后,中、美、日、法、英、俄等国开始进行激光驱动 ICF 的研究,30 多年来,ICF

研究已在世界范围内取得了重要进展,有望在近10年内实现点火。国际上已有的激光核聚变装置有NOVA、大坂“XII”、美国OMEGA激光装置和国家点火系统NIF等。我国也相继建立了“星光”、“神光”系列等激光装置,进行了ICF物理研究。

为了开展更深层次的ICF物理研究,在“神光-I”、“神光-II”相继研制成功后,我国已启动了“神光-III”装置的研制规划。其中,神光-III原型装置作为先期验证性工程已基本建成,其靶场监测系统主要任务是监测并调整放在真空靶室中心的实验靶的位置和姿态,同时监测并引导多路打靶激光使其会聚到靶上正确位置,其总的打靶精度控制在 $30\ \mu\text{m}$ 以内,是目前国内ICF实验装置中对靶瞄准定位系统的功能和性能的要求最高的,部分指标甚至超过了NIF等国外同类装置的技术要求<sup>[1-4]</sup>。

在原型装置中,靶场坐标参考系统作为靶场监测系统的组成部分,必须预先建立,这是因为各种物理诊断监测设备均以靶室的中心为安装基准。为了准确的测定打靶后的实验数据,必须每次将实验靶引导到靶室的中心。坐标系建立以后,在每次打靶之前需复现靶场的中心即坐标原点,并将该坐标原点传递到靶监测传感器上,最终通过传感器将实验靶引导到靶室中心。根据以上的目的,作者提出了一种新的建立靶场坐标参考系统的方法,并研制了三台视觉测量仪器,最终建成靶场坐标参考系统。该系统现已成功应用于原型装置中,可满足系统的监测要求。

## 2 靶场坐标系的建立方法

靶室结构为一个直径为 $2.4\ \text{m}$ 的球体,确立靶场坐标系,首先要确立坐标系的原点。由于各种物理诊断监测设备均以靶室的法兰为安装基准,坐标系原点确立的基本思想是以靶室的法兰为基准找出靶球中心,靶球球心即为坐标原点。具体实现过程如下:

如图1所示,在将要安装靶监测仪的法兰及与其相对的法兰上各安装一块盲板,板上装有十字叉丝,连接两个十字叉丝的中心点就构成一条穿过球心的直线。在另外一台监测仪方向上安装另外两块盲板构成另外一条穿过球心的直线。两

条直线的交点即为靶室的中心。

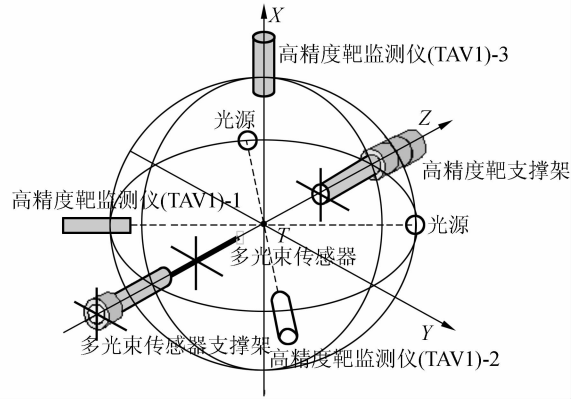


图1 靶场坐标系原理图

Fig. 1 Coordinate system for target field

确定靶室的中心后,需将三台监测仪调整为互相垂直并正交于该中心的位置。为实现这一目的,本文设计了一种标准定位靶,结构如图2、图3所示。靶的前面和后面镀有反射面,并刻有十字线和正方形定位标志,各定位标志面互相垂直,各十字线和方形标志对心精度为 $2\ \mu\text{m}$ ,各反射面垂直度和平行度小于 $\pm 2^\circ$ 。

坐标系传递时首先要将靶室的坐标系传到标准定位靶上。传递过程如下:将标准靶通过六自由度机械手送入靶球内,通过靶球外面的内调望远镜将标准靶上后靶体上的反射面的十字刻线与盲板上的十字叉丝重合,这样就将靶室坐标系转到了标准靶上。

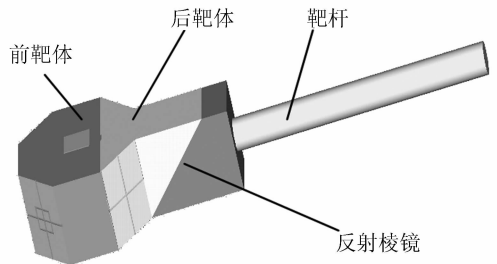


图2 标准定位靶

Fig. 2 Standard target

标准靶调整完毕后,以标准靶为基准调整三台监测仪,当三台监测仪准直系统与预先标定好的零点重合,表明三台监测仪光轴互相正交。再调整监测仪显微系统,使靶的十字线或正方形中心与CCD像敏面中心重合。反复调整,直到两个条件均满足为止。此时,靶室坐标系就由标准靶

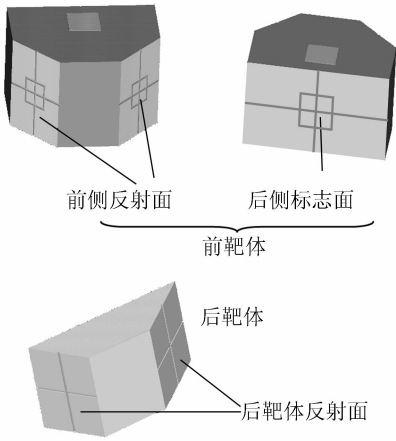


图 3 标准定位靶部件图

Fig. 3 Parts of standard target

转移到监测仪上,该靶室坐标系由三台监测仪确定。实际工作中调平两台监测仪完全可以建立起坐标系,另外一台监测仪可以作为冗余系统使用。

每次打靶前,监测仪将靶室坐标系传递到传感器上。传感器上安装有定位标志,定位标志上装有两个互相垂直的十字分划板,并镀有反射膜。定位标志外形结构如图 4 所示,两个分划板的十字线中心连线互相垂直并相交于一点,其交点即为传感器的中心。通过监测仪对定位标志的监测,实现坐标系由监测仪向传感器的转移,同时完成对传感器位姿的调整。最后由传感器完成对试验靶的监测与光点的引导<sup>[5]</sup>,并将靶场坐标系最终传递到试验靶上,从而保证了每次打靶时都能保证试验靶位于靶室中固定的位置。

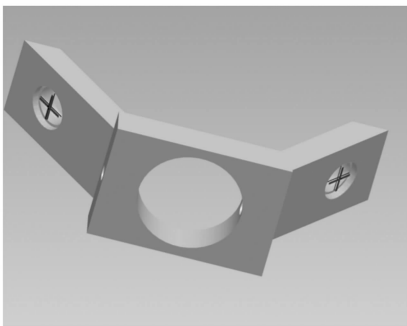


图 4 定位标志示意图

Fig. 4 Locating sign drawing

为建立以上这种监测系统,本文设计了一种兼具显微和准直功能的图像式光电测量仪器,采用 CCD 作为图像接受器件。该仪器即可以对被

测目标进行二维尺寸测量,同时又具有自准直测角的功能,其工作距为 1 370 mm。

### 3 监测仪器的设计

#### 3.1 监测仪工作原理

本文设计监测仪器的工作原理如图 5 所示。该仪器主要由光学系统、光电接收器件 CCD、图像采集卡、电动调焦系统、计算机测量软件系统等组成。其中光学系统又分成三个子系统:自准直系统,用于测量被测物(镀有反射面)的转角;大视场显微系统,用于目标的快速搜索;小视场显微系统,用于目标的精确定位。

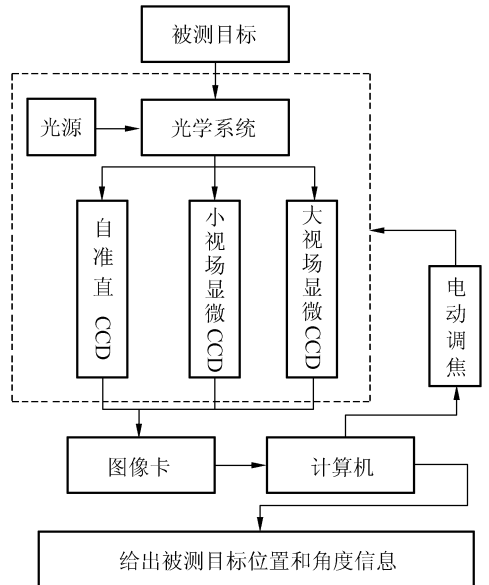


图 5 监测仪器的工作原理

Fig. 5 Operating principle of instrument

#### 3.2 监测仪光学系统设计

光学原理如图 6 所示。其中 2、3、8、9、10、11、12 构成准直系统,2、3、4、5 构成低倍率大视场范围监测系统,2、3、4、6、7 构成高倍率小视场范围监测系统。为简化结构,准直系统与显微系统共用一组物镜 2。

当该光学系统用于测量目标转角时,其反射平面被物镜 2 成像于无限远的分划板上,经反射平面反射后,再经前组物镜 2 成像到准直 CCD9 像面上,通过采集卡采集 CCD 图像送入计算机进行图像处理。

当该光学系统用于目标精确定位时,被测目

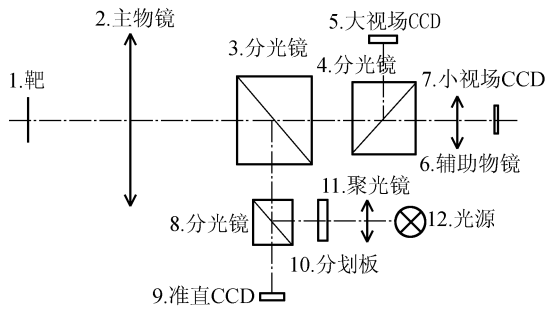


图 6 自准直显微系统光学原理图

Fig. 6 Optical principle chart of autocollimating microscope

标置于监测仪显微系统的物方空间,此时物镜 2 是显微物镜,经分光镜 3、4 成像于 5 的像面上,该路显微系统放大倍率为 0.3 倍,用于靶粗调的大范围监测;用于小视场范围监测时,目标经 2、3、4、6 成像于 7 的像敏面上,该路显微系统放大倍率为 1.3 倍。

光学设计的主要参数如下:自准直光学系统光学分辨率为 3.3",测量范围为 28'×21'(水平方向×垂直方向);小视场系统光学分辨率为 6.6 μm,视场大小为 5 mm×3 mm;大视场系统光学分辨率为 8.8 μm,视场大小为 22 mm×16.5 mm。系统照明采用中心波长为 525 nm,带宽 <10 nm 的 LED 光源。

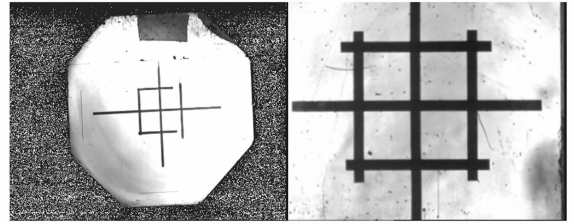
### 3.3 图像的处理过程及细分算法的选取

仪器使用过程中,采用的是视觉测量系统。图 7 为 CCD 采集的标准靶图像。

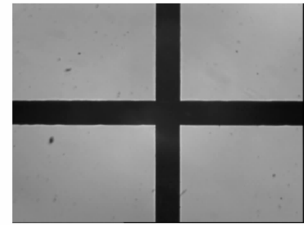
通过对显微图像图 7(b) 的十字线边缘的提取,并采取相应图像处理方法,可以求出十字线中心的位置坐标,即可以确定被测靶的二维位置信息。

同样通过图像处理的方法,提取准直图像图 7(c) 的十字线中心位置,并计算准直图像十字线中心偏离零点的距离可以求出标准靶反射面的偏转角信息<sup>[6-7]</sup>。

选用的 CCD 型号为 WATEC-902H,该 CCD 像素大小为 8.6 μm。为了提高测量精度,在图像处理过程中,采取了像素细分措施。图像细分方法有很多,在众多的边缘细分定位算法中空间灰度矩细分定位法具有较高的定位精度,能达到 1/20 个像素而且不受加性噪声和乘性噪声的影响,本系统采用了该方法对图像进行了细分。



(a)大视场图像 (b)小视场图像  
(a)Large field image (b)Small field image



(c)自准直图像  
(c)Self alignment image

图 7 CCD 采集的图像  
Fig. 7 Grabbed image by CCD

## 4 实验结果及精度分析

### 4.1 单台监测仪实验结果及精度分析

#### 4.1.1 显微系统试验结果

单台监测仪对标准定位靶进行监测,靶不动,通过监测仪小视场显微系统对靶上十字刻线中心进行重复性定位实验,结果如表 1。

表 1 监测仪显微系统对靶定位重复性测试

Tab. 1 Repeatability accuracy of microscope positioning

	x 方向(pixel)	y 方向(pixel)
1	277.9	367.4
2	277.9	367.2
3	277.9	367.2
4	277.9	367.3
5	278.0	367.1
6	277.9	367.2
7	278.0	367.2
标准差	0.08	0.10

经标定后监测仪高倍率小视场监测 CCD 像素当量约为 5.5 μm/pixel,因此监测仪定位重复性精度(标准差)为  $s = \pm\sqrt{0.08^2 + 0.1^2} \times 5.5 = \pm 0.7 \mu\text{m}$ 。则其重复性精度为:

$$\Delta_d = \pm 2s = \pm 1.4 \mu\text{m} (2\delta), \quad (1)$$

#### 4.1.2 准直系统试验结果

为了验证标定后准直系统测角的精度,将监测仪准直系统测得的数据与双频激光测角系统的读数进行比对。实验方法是把一个平面反射镜和双频激光的测角双角锥棱镜组固定在同一转台上,监测仪与双频激光对面放置,分别与平面反射镜和双角锥棱镜配合进行测角。

实验结果如表 2 所示。从表中可以看出,自准直系统标定精度最大误差为  $0.70''$ 。

表 2 监测仪与双频激光测角比对

Tab. 2 Angle measurement accuracy comparison between monitor instrument and dual frequency laser interferometer

水平方向偏转角度值(°)			垂直方向偏转角度值(°)		
监测仪 测量值	双频激光 测量值	误差	监测仪 测量值	双频激光 测量值	误差
0.06	0	0.06	0.05	0	0.05
5.54	5.51	0.03	10.02	10.02	0.00
10.89	11.02	-0.13	16.89	16.90	-0.01
28.63	28.80	-0.17	41.66	41.83	-0.17
47.42	47.34	0.08	59.19	59.36	-0.17
59.87	59.99	-0.12	73.61	73.77	-0.16
71.99	72.14	-0.15	89.66	89.92	-0.26
84.03	84.16	-0.13	112.64	112.85	-0.21
95.12	95.44	-0.32	137.29	137.64	-0.35
109.39	109.71	-0.32	151.15	151.42	-0.27
120.89	121.24	-0.35	157.03	157.43	-0.40
143.14	143.66	-0.52	169.51	169.96	-0.45
164.02	164.70	-0.68	184.07	184.61	-0.54
182.66	183.36	-0.70	194.64	195.13	-0.49

## 4.2 靶场坐标系监测系统的精度分析

三台监测仪调整完成后,靶场坐标系即已建立,但监测系统总体精度很难用实验的方法进行验证,只能根据已有条件对各单项误差进行分析,然后通过误差综合,推算出整个监测系统的精度<sup>[8-9]</sup>。

### 4.2.1 三台监测仪不正交带来的坐标系方位误差

三台监测仪的正交是靠标准定位靶上三个正交的标准面为基准反复调整来实现的,因而造成不正交的误差有  $\Delta_1$ :

①标准定位靶面正交角度误差。该误差是标准定位靶制造和检测误差引起的,加工时控制在  $\pm 2''$  以内,因而该误差  $\Delta_1' = \pm 2''$ 。

②监测仪的准直误差,该项误差是监测仪的准直系统的误差,其中包括准直物镜像差引起的对准十字线成像畸变、CCD 摄像机未准确放置在物镜焦面上的位置误差、图像处理误差等。根据实验,该误差可控制在  $\pm 1''$  以内,这样二维正交误差

$$\Delta_2' = \pm \sqrt{2} \cdot 1' = \pm 1.41'', \quad (2)$$

从而可得坐标系方位误差  $\Delta_0$  为

$$\Delta_0 = \pm \sqrt{\Delta_1'^2 + \Delta_2'^2} = \pm 2.5'', \quad (3)$$

由此方位误差会造成靶定位时歪斜,若靶长  $l$  为 5 mm,则由此带来的靶定位时的尺寸误差:

$$\Delta_1 = l \cdot \frac{\Delta_0^2}{2} \cdot \rho = \pm 0.08 \mu\text{m}, \quad (4)$$

式中  $\rho$  为角秒与弧度换算系数  $\rho = 0.000\ 004\ 85$ 。

### 4.2.2 监测仪图像处理误差 $\Delta_2$

该误差与监测仪系统分辨力、图像处理误差、数据处理模型误差等因素有关。根据实验验证,在光学系统放大倍数为 1.3 情况下,可保证单个靶监测仪的图像处理误差  $< 1 \mu\text{m}$ ,这样对二维坐标定位带来的误差为:

$$\Delta_2 = \pm \sqrt{2} \cdot r = \pm 1.4 \mu\text{m}, \quad (5)$$

### 4.2.3 标定误差 $\Delta_3$

监测仪的标定是用标准定位靶上的标准刻线在线标定的。影响标定误差的因素有标准靶上标准刻线间距检定误差  $\Delta_{3-1}$ ,标定时图像处理误差  $\Delta_{3-2}$  等。该刻线间距用双频激光干涉仪和二维视觉坐标测量机标定,因而  $\Delta_{3-1} = \pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

图像处理误差是刻线边缘用图像处理方法定位的误差,该误差可控制在  $\pm 0.5 \mu\text{m}$  以内。这样,

$$\Delta_3 = \pm \sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta_{3-1}^2 + \Delta_{3-2}^2} = \pm 1 \mu\text{m}, \quad (6)$$

### 4.2.4 光学系统畸变造成的放大倍数误差

光学系统畸变造成的放大倍数误差控制在  $1/10\ 000$ ,靶尺寸为 5 mm 时,由此带来的二维定位误差  $\Delta_4$ :

$$\Delta_4 = 5 \times \frac{1}{10\ 000} \cdot \sqrt{2} = \pm 0.7 \mu\text{m}, \quad (7)$$

### 4.2.5 调焦误差的影响

调焦不准带来的定位误差实质是调焦误差引起放大倍数变化,采用物方远心光路,可消除该项误差的影响,这里略之。

### 4.2.6 监测仪定位重复性误差 $\Delta_5$

该项误差是用监测仪对坐标系多次定位时的

重复性误差,它包含在 $\Delta_1 \sim \Delta_4$ 之中,同时还受温度和机械稳定性影响。考虑到定位时三个监测仪同时工作,三个监测仪的不一致性也表现在重复性误差内,由公式(1)可知,单台仪器的重复性误差为 $\pm 1.4 \mu\text{m}$ ,则三台仪器的误差为:

$$\Delta_5 = \pm\sqrt{3} \times 1.4 = 2.42 \mu\text{m}, \quad (8)$$

#### 4.2.7 机械锁紧和变形的影响

经有限元分析计算,此项误差为:

$$\Delta_6 = \pm 1.21 \mu\text{m}, \quad (9)$$

#### 4.2.8 温度影响

其使用环境为恒温,则此项误差可忽略不计,必要时可用修正法修正。

#### 4.2.9 监测系统误差合成

监测系统总误差为:

$$\begin{aligned} \Delta &= \pm\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2} = \\ &\pm\sqrt{0.08^2 + 1.4^2 + 1^2 + 0.7^2 + 2.42^2 + 1.21^2} = \\ &\pm 3.28 \mu\text{m}, \quad (10) \end{aligned}$$

最终得到靶场监测系统的综合误差为 $\pm 3.28 \mu\text{m}$ ,满足监测系统的精度要求。

## 5 结 论

本文根据神光-III原型装置监测系统的需求,建立以靶球为原点的高精度坐标参考系统。提出了一种新的ICF靶场坐标系建立的方案,并据此设计了一种光学标准定位靶和基于视觉测量原理的监测仪,该监测仪工作距为1370 mm,同时具有自准直测角和目标的精确定位功能。其单机重复瞄准精度优于 $\pm 1.4 \mu\text{m}$ ,自准直系统测角精度优于 $0.7'$ ,精度分析结果表明靶场坐标系监测精度优于 $\pm 3.28 \mu\text{m}$ 。该系统可实现对靶球内目标实现实时监测,该系统已成功运用于神光III原型装置中。

## 参考文献:

- [1] BOEGE S J. NIF pointing and centering systems and target alignment using 351nm laser source [J]. *SPIE*, 1997, 3047:248-258.
- [2] 黄宏一,顾震,范滇元. 神光II装置的靶瞄准系统[J]. 中国激光, 1998, 25(8):711-714.  
HUANG H Y, GU ZH, FAN D Y. Target collimating system for shenguang II device[J]. *Chinese Journal Lasers*, 1998, 25(8): 711-714. (in Chinese)
- [3] 李富全,袁晓东,刘昌孝. ICF实验中的靶识别技术[J]. 光电工程, 2005, 32(5):55-57.  
LI F Q, YAN X D, LIU CH X. Target recognition technique in ICF experiment [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2005, 32(5):55-57. (in Chinese)
- [4] 刘国栋,浦昭邦,张琢,等. 惯性约束核聚变靶场监测系统空间坐标系的建立与标定方法[J]. 光学技术, 2004, 30(2): 204-205.  
LIU G D, PU ZH B, ZHANG ZH, *et al.*. The method of coordinate building and calibrating for ICF shooting range monitoring system [ J ]. *Optical Technique*, 2004, 30(2):204-205. (in Chinese)
- [5] 刘国栋,蔡丹,浦昭邦,等. 一种基于差动调焦的激光共轭引导传感器[J]. 光学技术, 2005, 31(5):746-748.  
LIU G D, CAI D, PU ZH B, *et al.*. A laser conjugation directing sensor based on differential focusing [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5): 746-748. (in Chinese)
- [6] 王向军,韩双来. 弹着点坐标系测量系统快速校准方法及精度分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6):686-690.  
WANG X J, HAN SH L. A high speed camera calibration method in coordinate measurement of bomb-fall and its precision analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 686-690. (in Chinese)
- [7] 陈世哲,浦昭邦,刘国栋. 二维自跟踪视觉准直测量系统[J]. 光电工程, 2005, 31(9):55-57.  
CHEN SH ZH, PU ZH B, LIU G D. Two-dimension automatic tracking vision autocollimator system[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2005, 31(9):55-57. (in Chinese)
- [8] 王家骥,金光,颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2):105-116.  
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device

[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 105-116. (in Chinese)

- [9] 范大鹏, 张智永, 范世珣, 等. 光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(4): 673-680.  
FAN D P, ZHANG ZH Y, FAN SH X, *et al.*. Research of basic principles of E-O stabilization and tracking devices  
[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 673-680. (in Chinese)

**作者简介:** 刘炳国(1975—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系讲师, 现在自动化测试与控制系攻读博士研究生, 主要从事精密仪器设计、图像处理技术、二维视觉测量技术等研究。E-mail: liu\_bingguo@hit.edu.cn