

扫描镜动态性能的自准直检测技术研究

高 敏^{1,2} 卞正兰^{1,2} 董作人¹ 叶 青¹ 方祖捷¹ 瞿荣辉¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为检验扫描镜的动态性能,提出了一种动态自准直检测方法,该方法巧妙地将被检扫描镜和动态靶标上目标模拟反射镜纳入动态光电自准直仪准直光束的传播路径中,并构成闭合的光学自准直测量回路。设计了扫描镜动态性能的自准直检测装置,并利用自准直方法对动态靶标的自身精度进行标定。实验结果表明,动态靶标在 360° 的范围内的动态精度为 $\pm 15 \mu\text{rad}$,可检测最大速度为 $80^\circ/\text{s}$,最大加速度为 $50^\circ/\text{s}^2$ 。将该检测方法和装置应用于某型号空间激光照明成像跟踪系统中扫描镜的方位轴、俯仰轴独立性能的检验,获得了相应的静态轴系晃动、阶跃响应和连续跟踪等性能数据,为扫描镜的性能改进提供了参考和帮助。

关键词 测量;扫描镜;动态性能;动态靶标;自准直

中图分类号 TP216 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0208001

Research on Performance Test of Scanning Mirror Based on Dynamic Autocollimation

Gao Min^{1,2} Bian Zhenglan^{1,2} Dong Zuoren¹ Ye Qing¹ Fang Zujie¹ Qu Ronghui¹

(¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To evaluate the dynamic performance of the scanning mirror, a dynamic autocollimation method is presented. The scanning mirror under test and the rotating mirror for target simulation fixed on the dynamic target are skillfully incorporated into the collimated beam propagation path of a dynamic autocollimator, constituting a close loop of optical auto-collimation measurement. The measurement system of performance inspection for the scanning mirror based on dynamic autocollimation is designed, and the calibration method for the accuracy of the dynamic target based on autocollimation is introduced. Experimental results show that the dynamic accuracy of the autocollimation measurement system is $\pm 15 \mu\text{rad}$ in the 360° rotation range, and the maximum velocity and acceleration available for test are $80^\circ/\text{s}$ and $50^\circ/\text{s}^2$, respectively. The test method and device are used to test the dynamic performances of each axis individually of the scanning mirror adopted in a space laser illumination imaging tracking system. Related test data including wobble of shaft, step response, and continuous tracking are acquired, which will provide reference and help for the performance improvement of the scanning mirror.

Key words measurement; scanning mirror; dynamic performance; dynamic target; autocollimation

OCIS codes 120.0120; 120.1680; 120.4610

1 引 言

扫描镜^[1]在激光雷达^[2]、航空相机^[3]、空间激光

通信^[4]和光电对抗^[5]等领域具有重要应用,其主要功能是实现光束或成像区域的扫描、目标的捕获、跟

收稿日期: 2010-09-08; 收到修改稿日期: 2010-10-08

基金项目: 上海市科技启明星(09QB1400700)、上海市自然科学基金(09ZR1435200)和上海市科委重点基础项目(09JC1414800)资助课题。

作者简介: 高 敏(1985—),男,博士研究生,主要从事光电跟踪检测技术方面的研究。E-mail: gaomin@siom.ac.cn

导师简介: 瞿荣辉(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电子器件及系统技术等方面的研究。

E-mail: rhqu@siom.ac.cn

踪与瞄准等。通常,扫描镜在外场使用前对其指向精度和动态跟踪性能等关键技术指标进行室内检验是非常必要的,它必须事先在实验室内建立高精度的光学运动目标模拟装置和检测系统。当前,在相关的研究领域,文献[6]针对经纬仪系统的性能检测,采用光学动态靶标装置模拟飞行目标进行跟踪精度室内检验;文献[7]为解决星间激光通信光束微弧度跟瞄性能检测需求,利用两个相同的级联棱镜正交旋转来模拟光束的偏转;文献[8,9]提出用压电陶瓷(PZT)驱动点光源在长焦距透镜焦平面上做线性运动,实现微弧度量级的光束偏转;文献[10]采用高精度经纬仪检测扫描镜的指向精度;文献[11]基于激光检测技术和 CCD 探测技术对扫描镜的动态摆角进行检测;文献[12]针对扫描镜动态性能的室内检验,提出用点光源沿直线轨道往返运动模拟光学运动目标,采用摄像机实时测量运动目标位置,为扫描镜提供位置脱靶量进行跟踪检测的方法。由于扫描镜只是一个二维转动执行机构,其本身不带有目标探测功能,为实现其动态性能的检测,需要构建一个位置闭环的目标跟踪过程,所以必须为其配备高精度的目标位置探测功能。文献[1~9]提出的方案主要是针对自身带有目标探测器的经纬仪系统或者通信终端的性能检验,因此不能直接用于扫描镜跟踪性能的检验;而文献[10,11]的方案中没有运动目标模拟功能,也不能用于扫描镜动态性能的检验;文献[12]的方案虽然是针对扫描镜动态性能的检验,然而存在目标运动形式单一、目标空间位置探测精度有限以及不能模拟无限远处目标的缺点。

本文针对某型号空间激光主动照明成像跟踪系统中扫描镜的动态性能检测需求,提出一种动态自

准直检测方法,即将动态靶标上运动目标模拟反射镜和被检扫描镜纳入光学自准直回路中,构成闭合的跟踪检测系统,其中目标模拟反射镜由电机带动模拟运动的空间光学目标。自准直测角部分为扫描镜提供快速高精度的脱靶量测量功能。由于自准直测角精度高,排除了跟踪误差中测角精度的因素影响,因而跟踪误差直接反映了扫描镜的动态响应性能。实验对扫描镜单独的方位轴和俯仰轴的动态性能进行了检测,获得了相应的轴系晃动误差、阶跃响应性能和连续跟踪误差数据等,为扫描镜的问题分析和性能改进提供了参考和依据。

2 检测系统原理与设计

扫描镜的动态自准直检测系统主要由动态靶标、动态光电自准直仪、数据采集与处理单元和计算机测控系统等组成,如图 1 所示。其中动态靶标由中空电机、固定在电机中间通孔位置的旋转臂以及安装在旋转臂中间通孔位置并与旋转臂旋转面成 45°角的反射镜(以下简称 45°反射镜)、目标模拟反射镜和辅助反射镜等组成。自准直仪发出的平行光束穿过中空电机,经 45°反射镜反射后,入射到旋转臂一端的目标模拟反射镜上,经再次反射后形成模拟目标光束输出。在计算机的控制引导下,目标模拟反射镜由电机带动并按照设定的程序旋转,形成一个具有空间圆周运动轨迹的模拟目标。检测时,将被检扫描镜置于自准直仪发出光束的传播路径中,并构成闭合的自准直测量回路,比如图 1 中的 P 点,使得光束返回至自准直仪。启动电机按照设定的程序旋转,动态光电自准直仪主动实时测量目标模拟反射镜与被检扫描镜的角度偏差,并由数据采

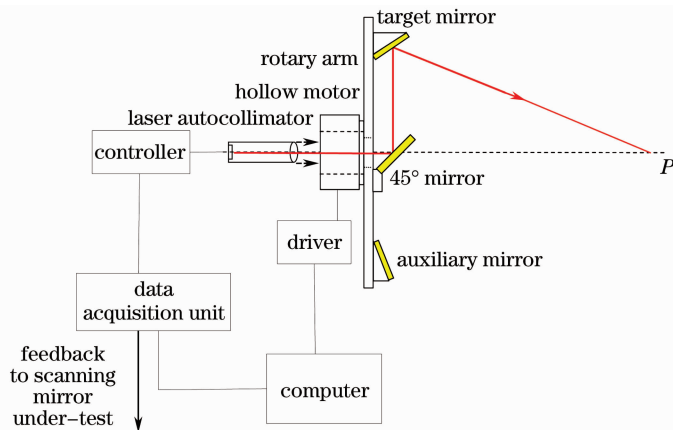


图 1 扫描镜的动态自准直检测系统框图

Fig. 1 Block diagram of the performance test bench for scanning mirror

集与处理单元反馈控制扫描镜作相应运动以跟踪目标模拟反射镜。闭环跟踪时,由数据采集与处理单元同步记录动态光电自准直仪输出的跟踪误差数据并传递给计算机作后期分析处理。由于动态光电自准直仪测角速度快、精度高,此时的跟踪误差直接反映了扫描镜的动态响应性能。

动态靶标作为目标模拟单元,其自身必须具有较高的精度。影响动态靶标自身精度的主要因素是电机轴系晃动和旋转臂在旋转过程中的运动形变等。因此,动态靶标的设计主要考虑以下两点:1)选用轴系晃动小、定位精度高的电机带动旋转臂做旋转运动。综合考虑电机的负载能力和中空通光孔径等,选购 Newport 公司的高性能中空精密转台 RV160CC,它具有 360° 顺、逆时针旋转,最大速度 $80^\circ/\text{s}$ 和最大加速度 $50^\circ/\text{s}^2$,轴系晃动小于 $10 \mu\text{rad}$ 。2)旋转臂的设计主要考虑其刚度、重量以及相对于旋转轴的力矩平衡,以降低运动时的扭曲变形量。因此,选用力学性能良好、密度较小的铸铝合金材料

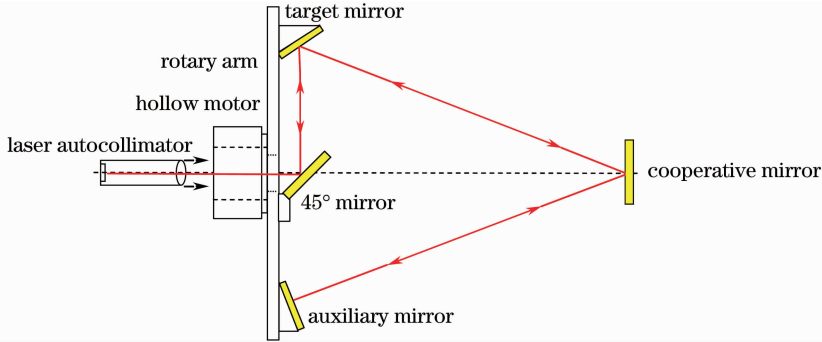


图2 动态靶标性能自检框图

Fig. 2 Block diagram of performance test of the dynamic target itself

对角度误差数据处理采用傅里叶变换分析方法^[14]。动态靶标连续旋转的性能自检实验得到的误差数据是周期性的,对误差数据做傅里叶展开

$$E_s(\varphi_s) = \frac{a_{0s}}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\varphi_s + b_k \sin k\varphi_s), \quad (1)$$

式中 $E_s(\varphi_s)$ 为性能自检时的角度误差数据, $k = 1, 2, 3, \dots$, 为展开的各次谐波, $\frac{a_{0s}}{2}$ 为常数项, φ_s 为转角位置。各次谐波分量可表示为

$$a_{0s} = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n E_s(\varphi_s), \quad (2)$$

$$a_k = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n E_s(\varphi_s) \cos k\varphi_s, \quad (3)$$

$$b_k = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n E_s(\varphi_s) \sin k\varphi_s, \quad (4)$$

来加工旋转臂,并在旋转臂上与目标模拟反射镜相对的一端安装辅助反射镜,以保证旋转轴两边的力矩平衡。检测系统要求动态光电自准直仪具有快速高精度测角能力,因此选购 Newport 公司型号为 LDS1000 的自准直仪,它具有 $\pm 2000 \mu\text{rad}$ 的测角量程, $\pm 1 \mu\text{rad}$ 的测角精度和最大 2 kHz 的数据采样率。

3 动态靶标性能自检

动态靶标性能自检^[13]的方法是将电机轴系晃动量和旋转臂的运动变形量转变成角度量的变化,并用动态自准直仪进行测量。如图2所示,利用一块外置的合作反射镜和旋转臂上与目标模拟反射镜配重的辅助反射镜,构成闭合的光学自准直测量回路。当旋转臂在电机的带动下转动时,电机的轴系晃动、旋转臂的扭曲变形都将体现在自准直仪测量的角度误差中。

式中 n 为误差数据在一个周期内的采样点数。

经分析可知,常数项 $\frac{a_{0s}}{2}$ 的物理含义是初始的

光机装调误差,为系统误差; $k = 1$ 时的基频分量的物理含义是轴系误差,即动态光电自准直仪发出光束的光轴与中空电机的旋转轴在各个转角位置的倾斜; $k = 2, 3, \dots$ 时,表示各个转角位置的随机误差;因此,将误差数据中的常数项和基频分量去除后的数据即为动态靶标自身的精度。

利用上述方法对研制的动态靶标自身精度进行标定,实验结果如图3(a)和(b)所示。可以看出动态靶标在 360° 旋转范围内二维动态误差均小于 $15 \mu\text{rad}$,满足了扫描镜静态精度检测需求。

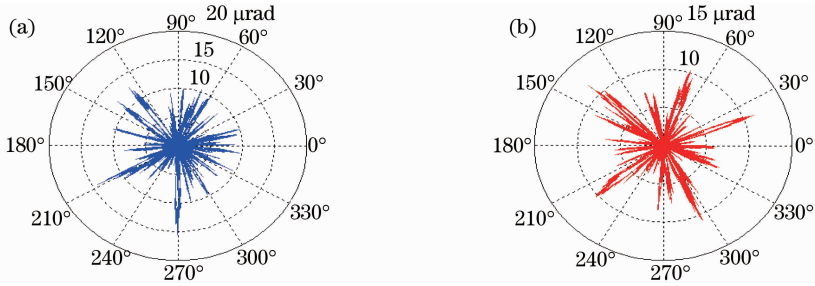


图 3 动态靶标自身动态精度。(a)方位轴误差,(b)俯仰轴误差

Fig. 3 Dynamic accuracy of dynamic target. (a) azimuth error, (b) elevation error

4 扫描镜单独轴系性能检验实验

为了充分地了解扫描镜两轴各自的静动态性能,并排除扫描镜两个旋转轴相互耦合的因素影响,分别对其方位轴和俯仰轴进行单独检测。根据检测原理,在图 1 所示的检测装置的基础上,对其稍加改动,得到两轴分开检验装置,如图 4(a)和(b)所示。图 4(a)所示的方位轴单独检测结构示意图中,是将

被检扫描镜代替图 1 中的 45°反射镜,并将目标模拟反射镜调整到反射面与旋转臂垂直,这样构成了闭合的自准直测量回路。启动旋转臂旋转时,自准直仪探测到角度偏差并通过数据采集与处理单元反馈驱动扫描镜去跟踪目标反射镜,此时扫描镜只需做方位转动即可,俯仰轴不需响应,从而实现方位轴的单独检验。同理,图 4(b)中可实现俯仰轴的单独检验。

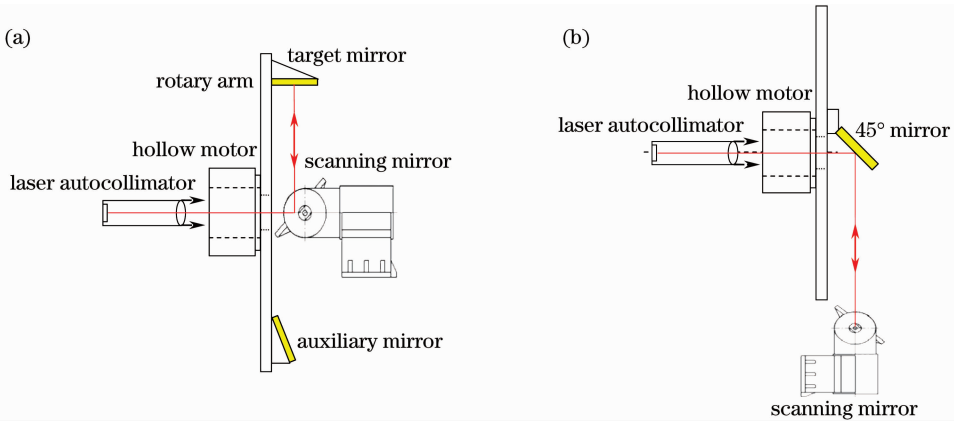


图 4 两轴性能分开检测。(a)方位检测,(b)俯仰检测

Fig. 4 Dual axis performance test individually. (a) azimuth test, (b) elevation test

4.1 指向精度

扫描镜轴系的静态晃动误差可以反映其指向精度。按照图 4(a)和(b)所示,给扫描镜控制系统上电,使扫描镜处于状态维持模式,这时记录下一段时间内自准直仪测量的二维角度值变化,就反映了扫描镜轴系的静态晃动误差情况。经过傅里叶变换处理数据,去除固有误差外的动态随机误差,就可以表征扫描镜的静态指向性能。图 5 为扫描镜方位、俯仰轴的静态指向误差实验测试结果。可见方位轴静态误差较小,为 $\pm 10 \mu\text{rad}$,俯仰轴静态误差较大,为 $\pm 100 \mu\text{rad}$ 。

4.2 阶跃响应

当激励为阶跃函数时,控制系统的零状态响应称为阶跃响应。阶跃响应是评价控制系统动态性能

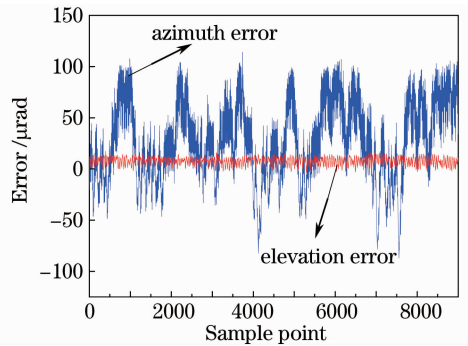


图 5 两轴静态指向精度

Fig. 5 Dual axis static pointing accuracy

和获取系统频率响应特性的重要途径。在如图 4(a)和(b)所示的测试情况下,转动旋转臂一定角度,模拟一定的初始角度偏差,启动扫描镜控制系

统进入闭环跟踪状态,记录下自准直仪角度偏差数据变化情况,即可实现各轴阶跃响应性能的检验。图6分别为方位轴和俯仰轴的阶跃响应,其中采样点间隔对应0.5 ms。可见方位和俯仰轴的建立时间均大约为0.5 s,并且没有过冲现象。

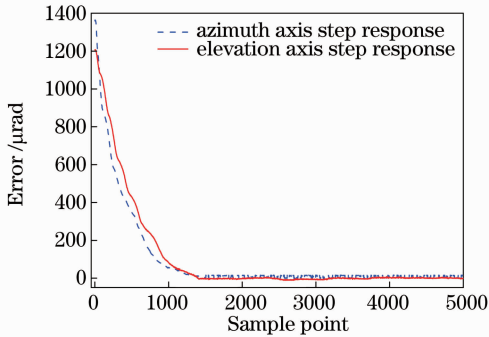


图6 两轴阶跃响应

Fig. 6 Dual axis step response

4.3 动态跟踪

如图4(a)和(b)所示的装置结构,启动动态靶

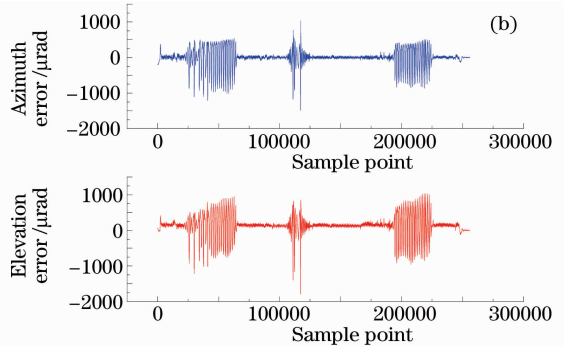
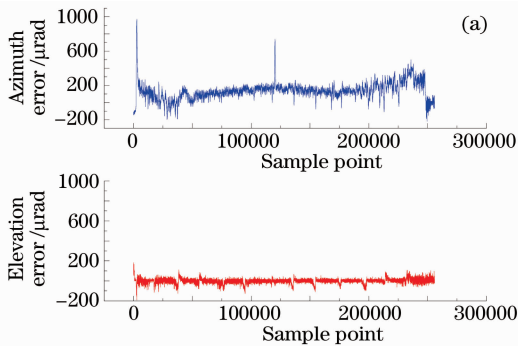


图7 连续跟踪检测。(a)方位跟踪,(b)俯仰跟踪

Fig. 7 Continuous tracking test. (a) azimuth tracking, (b) elevation tracking

5 结 论

针对扫描镜这种自身不带有目标探测功能的光束导向装置的动态性能检验问题,提出了一种动态自准直方法,即将目标模拟反射镜和被检扫描镜融入光学自准直光路中,构成闭合的自准直测量回路,其中自准直测角部分承担高精度的目标探测功能。搭建了自准直检测系统,并对其自身精度进行标定。将自准直检测系统应用于扫描镜两轴系独立的静态晃动、阶跃响应和动态跟踪性能检测,获得了相关检测数据。该检测方法和系统也可用于扫描镜双轴动态性能的检验。

参 考 文 献

1 Ma Jianguang. The basic technologies of the acquisition, tracking and pointing systems[J]. *Optical Engineering*, 1989, (3): 1~42

标连续旋转,并同时启动扫描镜进入闭环跟踪状态,实时记录下的跟踪误差数据即为动态跟踪精度。图7(a)和(b)分别为目标连续转过 18° 范围方位跟踪误差曲线和目标连续转过 16° 范围俯仰跟踪误差曲线。从两幅误差曲线上看,有以下几个共同点:1)跟踪初始阶段,存在过冲现象;2)跟踪过程中,都有静态滞后误差,且在某些跟踪位置出现动态误差特别大的现象;3)跟踪末期,目标先停止后,反射镜经过一定的过冲后,回归零位。对比来看,有以下几个不同点:1)方位跟踪时,俯仰轴误差几乎只是静态晃动误差,进一步说明此时俯仰轴几乎没动作。而俯仰跟踪时,在跟踪误差较大位置,方位轴也出现类似同步的较大误差,而在其他位置的误差几乎是处于零位附近的静态误差。可能的原因是俯仰轴的晃动耦合到方位轴引起同步晃动。2)方位跟踪时,有一个位置存在误差尖峰,而俯仰跟踪时,有三个区域出现误差值的较大振荡。

马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. *光学工程*, 1989, (3): 1~42

2 Ravindra Singh, Ashwani Mudgil, Chandra Prakash *et al.*. Gimballed mirror control in remote sensing LIDAR for environmental monitoring [C]. *SPIE*, 2006, **6409**: 64091F

3 Fu Yun. Research on the Design of Scanning Mirror System of the Aerial Camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of Chinese Academy of Sciences, 2003

付 芸. 航空相机扫描反射镜系统研究与设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003

4 Zhang Leihong, Yang Yan, Hu Shanjiang *et al.*. The moving characteristics of directional driving motor in space tracking system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 233~237

张雷洪, 杨 艳, 胡善江 等. 空间激光跟踪中指向驱动电机运动特性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 233~237

5 Wu Songtao. The Study of the Two-Dimension Waving Mirror Structures and the Control System for Early Systems of the Missile [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006

吴松涛. 导弹预警系统二维摆镜结构及其控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006

- 6 Zhang Bo. Research on Programmable Dynamic Target [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of Chinese Academy of Sciences, 2003
张波. 可编程动态靶标的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003
- 7 Li Anhu, Sun Jianfeng, Liu Liren *et al.*. Design principle of performance testing device for laser beam microradian pointing and tracking in intersatellite laser communications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 975~979
李安虎, 孙建锋, 刘立人等. 星间激光通信光束微弧度跟瞄性能检测装置的设计原理[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 975~979
- 8 Qin Yi, Wang Jianming, Wang Lili *et al.*. Tracking target simulator and measuring techniques for the free space laser communication[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(4): 557~563
秦谊, 王建民, 王丽丽等. 卫星激光通信跟瞄精度测试方法及其实验研究[J]. 光学技术, 2007, **33**(4): 557~563
- 9 Keizo Inagaki, Tetsuya Miyazaki, Masayuki Fujise. High-speed tracking target simulator for fine tracking mechanisms [C]. *SPIE*, 1994, **2123**: 305~314
- 10 Ramuhalli Krishna. Improved pointing accuracy using high precision theodolite measurements[C]. *SPIE*, 1996, **2812**: 199~209
- 11 Zhang Guoyu, Jiang Huilin, Xu Xiping *et al.*. Laser dynamic testing method for swing angle of scanning mirror of infrared earth sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 875~881
张国玉, 姜会林, 徐熙平等. 红外地球敏感器扫描镜摆角激光动态测试方法[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 875~881
- 12 Darryll J. Pines. A lightweight high performance dual-axis gimbal for space applications[C]. *SPIE*, 1995, **2468**: 261~273
- 13 Guo Pingping. Research on Optical Dynamic Target Accuracy Test Method of Autocollimation [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of Chinese Academy of Sciences, 2004
郭平平. 光学动态靶标精度的自准直检测方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004
- 14 Sun Ning, Xia Xiumei, Qiao Yanfeng. Research on measurement dynamic precision of optical moving target [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2007, **30**(4): 37~39
孙宁, 夏秀梅, 乔彦峰. 光学动态靶标动态精度检测实验研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2007, **30**(4): 37~39