

文章编号: 0253-2239(2007)05-0875-7

红外地球敏感器扫描镜摆角激光动态测试方法

张国玉¹ 姜会林¹ 徐熙平¹ 于化东¹ 王凌云¹ 刘旭力² 黄 澜² 岳世新² 彭 慧²

(¹ 长春理工大学, 长春 130022
² 北京控制工程研究所, 北京 100089)

摘要: 为解决扫描镜摆角实时动态非接触测量问题, 基于激光检测技术和 CCD 探测技术, 提出一种红外地球敏感器扫描镜摆角激光动态测试方法, 并研制了扫描镜摆角动态测试系统, 其可实现扫描镜的摆动频率、零位角、幅值、峰峰值平均等参量的动静态激光非接触测量。介绍了系统的组成和总体结构, 着重对扫描镜摆角动态测量理论和大视场、大相对孔径特殊线性扫描光学系统的设计方法进行了分析与探讨, 通过建立系统的数学模型, 解决了测量数据误差修正与图形处理问题。对测量系统的精度进行了验证, 结果表明系统的摆角测量范围为 $0 \sim \pm 12^\circ$, 分辨力为 0.01° , 动静态测量精度优于 $\pm 0.04^\circ$ 。

关键词: 光学仪器; 扫描镜摆角动态测试; 激光非接触测量; 摆动扫描式红外地球敏感器

中图分类号: TP206⁺.1 文献标识码: A

Laser Dynamic Testing Method for Swing Angle of Scanning Mirror of Infrared Earth Sensor

Zhang Guoyu¹ Jiang Huilin¹ Xu Xiping¹ Yu Huadong¹ Wang Lingyun¹

Liu Xuli² Huang Lan² Yue Shixin² Peng Hui²

(¹ Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022
² Beijing Institute of Controlling Engineering, Beijing 100080)

Abstract: In order to settle the problem of real-time and dynamic non-contact measuring the swing angle of scanning mirror, a method of laser dynamically measuring swing angle of scanning mirror for the infrared earth sensor based on laser measuring technology and CCD detecting technology is presented. System for dynamically measuring swing angle of scanning mirror is developed, which can accomplish the dynamic and static laser non-contact measurement for the parameters of scanning mirror which are swing frequency, angle of zero position, amplitude value, average of peak values, etc. The composition and overall structure of system is introduced. Emphasis on analyzing and discussing the theory of dynamically measuring swing angle of scanning mirror, the method of design for large field of view, large relative aperture and special linear scanning optical system, the problems of error correction for measured data and graph manipulation are settled by established mathematic model of the system. The accuracy of measurement system is verified by experiment, the results indicated that measurement range of system for swing angle is $0^\circ \sim \pm 12^\circ$, distinguishing ability of the system is 0.01° , accuracy of dynamic and static measurement is less than $\pm 0.04^\circ$, this method of dynamically measuring swing angle is suitable.

Key words: optical instrumentation; dynamic testing for the swing angle of scanning mirror; laser non-contact measurement; swing scanning-type infrared earth sensor

1 引 言

红外地球敏感器是人造卫星上的一种姿态测量关键部件, 用于测量卫星本体与地球间的姿态偏差。

它借助于光学手段获取卫星相对于地球的姿态信息, 在这种形式的地球敏感器中, 通过一面扫描镜来实现红外探头对地球的扫视, 再通过光电转换和电

作者简介: 张国玉(1962—), 男, 吉林松原人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电检测技术与仪器、空间科学与技术、靶场测试技术等方面的研究。E-mail: zh_guoyu@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-05-16; 收到修改稿日期: 2006-09-25

路处理系统得到卫星的姿态偏差信息,地面或卫星上的控制系统据此来对卫星进行控制^[1]。为了实现测量过程中对地球的扫描,在地球敏感器内部有一套摆动扫描机构,其主要由扫描轴、扫描镜、动光栅、电机转子等组成,由力矩电机对其进行驱动,电机转子带动整个轴系在一定角度范围内做往返摆动。扫描镜是摆动扫描式红外地球敏感器的摆动关键部件,它的性能直接影响到整星的精度和可靠性,其摆角测试一直是亟待解决的技术难题,为此本文提出了一种用于扫描镜摆角实时动态、激光非接触自动测试方法,实现了红外地球敏感器扫描镜摆角的动态非接触测量。

2 系统的组成与总体结构

扫描镜摆角动态测试系统主要由半导体激光电源、激光发射光学系统、扫描接收光学系统、CCD 测量装置、电机驱动电源、计算机实时控制与数据处理系统等组成,其总体结构如图 1 所示。

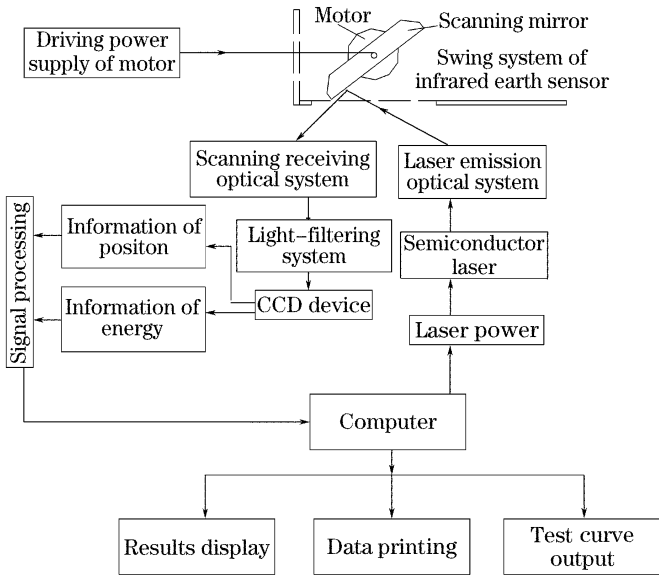


图 1 扫描镜摆角动态测试系统总体结构框图

Fig. 1 Overall structure schematics of dynamic measuring system for swing angle of scanning mirror

从半导体激光器发出的激光经由准直、扩束和整形光学系统等组成的激光发射光学系统后,形成一长条形细光束入射到扫描镜上,由扫描镜反射后的光线经扫描接收光学系统入射到 CCD 光敏面上,当扫描镜在电机驱动电源的驱动下按正弦规律摆动时,其像点在 CCD 上的位置也随之变化,该位置信息经 CCD 控制与驱动电子学系统处理后,送入计算机数据采集系统进行数据采集,可得到被测信息的位置与能量参量值。将其代入建立好的数学模型进行计算,便可得到扫描镜摆角的测量结果。通过计

算机数据处理软件可得到扫描镜摆角与时间的坐标曲线。

3 测量理论^[2~11]

3.1 摆角动态测量原理

系统测量原理如图 2 所示。当半导体激光器、激光发射光学系统、扫描接收光学系统、扫描镜和线阵 CCD 相对位置一定时, O 位于扫描镜的回转中心,线阵 CCD 靶面位于扫描接收光学系统焦平面上,扫描镜处于静止状态时,反射光线聚焦光点位于线阵 CCD 靶面中心 O' 。

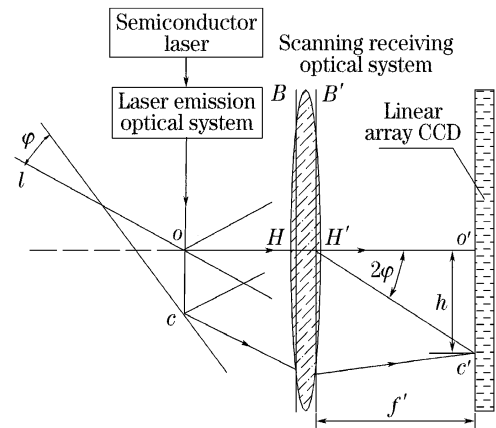


图 2 系统测量原理图

Fig. 2 Principle of the measuring system

固定的半导体激光器发出一束连续平行光,经过激光发射光学系统入射到扫描镜上。当扫描镜静止不动时,光线被扫描镜反射,透过扫描接收光学系统后聚焦到线阵 CCD 中心 O' 处。当扫描镜摆动时,由于入射角的改变,反射角也发生了改变,根据反射定理,入射光线不变,反射镜摆动 φ 角,则反射光线摆动 2φ 角。

当扫描镜按正弦规律摆动时,则可用 φ 描述其摆动特性:

$$\varphi = \varphi_0 \sin(2\pi \nu t), \tag{1}$$

式中 φ_0 为摆角最大振幅, ν 为摆动频率。当 φ_0 、 ν 皆为一定时,则摆角 φ 是时间 t 的函数。

设任意时刻扫描镜位置 2 偏离起始位置 1 的角度为 φ , 反射激光透过扫描接收光学系统后,聚焦到线阵 CCD 靶面 C' 处。 C' 至 O' 的距离为 h 。根据几何光学原理:

$$h = f \tan 2\varphi, \tag{2}$$

式中 f 为扫描接收光学系统焦距。对(2)式求反函数得

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{h}{f}\right), \tag{3}$$

对时间 t 设定采样时间间隔, 则测出一系列 h 值, 就可给出相应的角度 φ , 从而完成角位移 φ 的测量, 这就是本测试系统摆角动态测量的基本原理。

3.2 系统误差修正方法

如图 3 所示, 设 xoy 为基准坐标系, $x'o'y'$ 为扫描接收光学系统坐标系, 当扫描镜绕 O 摆动时, 反射点则由于与 O 不重合, 而偏离初始反射点 O , 且随 φ 动态变化, 反射光与光轴的交点在扫描接收光学系统坐标系的动态坐标为

$$x_0 = \frac{\sin(\beta + \varphi)}{\cos \varphi} \left[a + \frac{(1 - \cos \varphi)b}{\sin \varphi} \right], \quad (4)$$

式中 a, b 分别为初始反射点在基准坐标系 xoy 中的 x, y 坐标, β 为初始入射角。

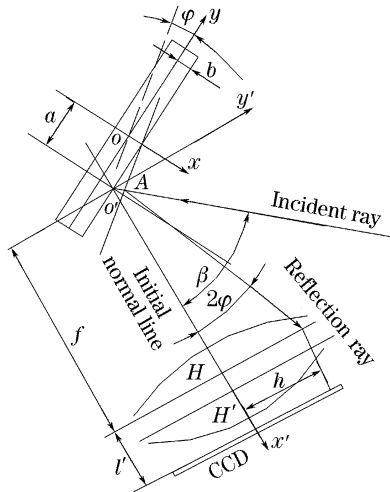


图 3 系统误差修正原理图

Fig. 3 Principle of correcting system errors

(4)式表明, 射入扫描接收光学系统的反射光线与光轴的交点随 φ 角而动态变化。沿光轴方向的轴上点的这一动态偏移量的作用是使扫描接收光学系统的两个输入参量之一的物方截距 L 也随 φ 角产生变化, 即 L 是 φ 的函数, 从而产生一种动态系统误差。为此, 必须用修正系数 $C(\varphi)$ 对(3)式进行修正, 即

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{C(\varphi) \cdot h}{f} \right], \quad (5)$$

式中修正系数函数 $C(\varphi)$ 也为 φ 的复杂函数。当由 CCD 测出 h 后, 由(5)式则可得摆角 φ 的测量结果, 这里规定顺时针 φ 为正, h 为负; 逆时针 φ 为负, h 为正。

4 扫描接收光学系统设计及光学探头的布局

4.1 扫描接收光学系统设计^[12]

由于红外地球敏感器扫描镜窗口布局和尺寸的

限制, 使得入射光不能通过扫描轴的回转中心, 当扫描镜摆动时, 扫描镜面上的光点位置将要移动即入射光与扫描镜反射表面的交点发生了平移, 而被测对象是反射光的方向, 检测结果应与这束光的位置无关, 这样, 由于入射光点位置的移动, 要求光学系统要有足够的口径, 因此必须特殊设计一种光学系统即大视场线性扫描接收光学系统, 其实质上是一个大视场准直平行光管。

为了满足扫描镜输出摆角 $\pm 12^\circ$ 的测量要求, 我们设计了一种视场角 $2\omega = \pm 24^\circ$ 、焦距 $f = 39.281 \text{ mm}$ 、相对孔径 $D'/f = 1/13$ 、入瞳位置 $L_p = -57.534 \text{ mm}$ 的扫描接收光学系统, 其不同视场 ($0^\circ, 6^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 24^\circ$) 的光路图如图 4 所示。

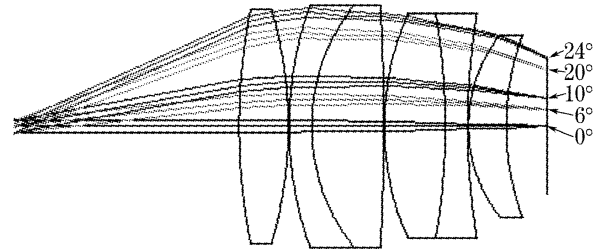


图 4 不同视场角的扫描接收光学系统光路图

Fig. 4 Optical path of scanning receiving optical system for different angle of vision

该光学系统的使用特点是镜头入瞳在前; L_p/f 近 1.5 倍; 必须将光源光束进入扫描镜后反射出来为 $\pm 24^\circ$ 视场光线成像在 CCD 上。总之, 它的特点是视场大且 $L_p > f$, 视场大, 本身的像差不好校正, 而 L_p 越大, 失对称性越大, 轴外像差越不好校正。该系统重点校正轴外失对称性像差, 使其达到使用要求, 既满足一般成像系统像质要求, 又满足激光聚焦镜头的变换关系。

若采用一对简单的对称胶合物镜组, 则其较好像质的入瞳 L_p 位置为 $L_p/f = 0.8$ 左右, 视场在 $\pm 20^\circ$ 左右, 相对孔径为 $1/5 \sim 1/10$ 。为了扩大视场, 增加 L_p 值, 由对称型演变为失对称型, 还能使像质保持较好的状态, 就须使影响像质的关键因素 i_p 变化和分布合理, 才能使轴外(视场)像差小到要求的范围。所以在其前后多增加一片分别向两个方向弯曲的透镜, 且其光焦度分配应满足总光焦度的要求, 该扫描接收光学系统子午方向的球差、像散及场曲曲线如图 5 所示。

4.2 光学探头的总体布局

光学探头的布局有两种方案可供选取, 一是光轴与扫描镜静止时光轴与反射光线不重合的情况, 如图 6(a)所示; 二是光轴与扫描镜静止时光轴与反

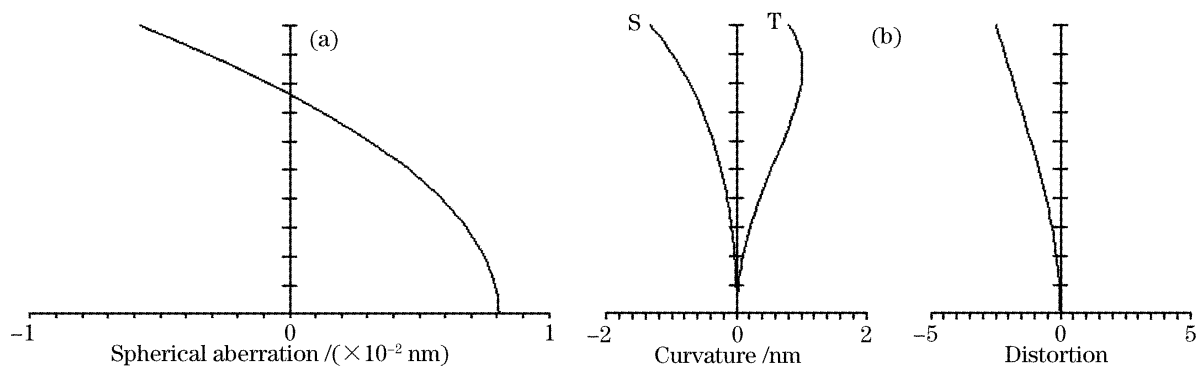


图 5 扫描接收光学系统子午像差曲线。(a) 球差, (b) 像散和场曲

Fig. 5 Meridional ray aberration curve of scanning receiving optical system. (a) Spherical aberration curve, (b) curvature and distortion curves

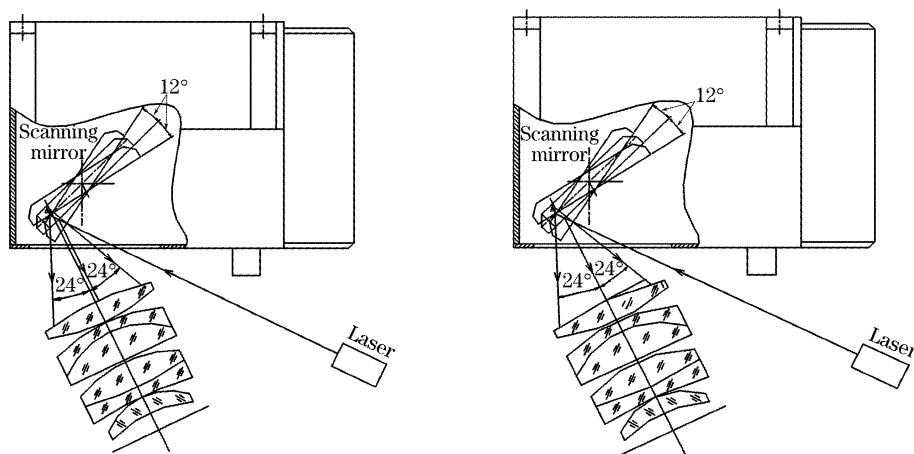


图 6 扫描静止时光学探头布局图(a), 光轴与反射光线不重合(b)光轴与反射光线重合

Fig. 6 Outline of optical probe. (a) Optical axis is not superposition to reflective ray, (b) optical axis is superposition to reflective ray

射光线重合情况,如图 6(b)所示。两种情况相比,实现的功能完全一致,但各有其特点,第一种情况,扫描镜极限摆角的反射光线相对于光学系统的光轴为对称式结构,有利于减小透镜的口径。第二种情况虽然可使扫描镜处于静止(零位)的反射光线成像在 CCD 的中心上,但其扫描镜极限摆角的反射光线相对于光学系统的光轴不对称,致使反射光线入射到透镜上相对于光轴一边大,而另一边小,使透镜的口径不能得到充分利用。所以尽可能选择第一种方案。

5 摆角测量误差理论分析

5.1 主光线

针对设计的扫描接收光学系统,表 1 给出了 5 种扫描镜摆角情况下的理想像高 h_0 、主光线实际像高 h_z 、修正后的主光线像高 h'_z 、以及修正前后由于理想像高与主光线实际像高的偏差所造成的摆角测量误差 $\Delta\varphi_z$ 和 $\Delta\varphi'_z$ 的计算结果。

由表 5 可知,由于光学系统存在像差成像不理想而产生的摆角测量误差 $\Delta\varphi_z \leq \pm 0.1415^\circ$, 误差值

表 1 扫描镜摆角测量误差计算结果

Table 1 Calculated results for swing angle measurement error of scanning mirror

Swing angle of scanning mirror $2\varphi / (^\circ)$	Field of view $\varphi / (^\circ)$	h_0 / mm	h_z / mm	h'_z / mm	$\Delta\varphi_z / (^\circ)$	$\Delta\varphi'_z / (^\circ)$
± 12	± 24	± 17.4891	± 17.2571	± 17.4210	± 0.1415	± 0.041
± 10	± 20	± 14.2971	± 14.1927	± 14.3275	± 0.0673	± 0.020
± 5	± 10	± 6.9263	± 6.8875	± 6.9529	± 0.0275	± 0.019
± 3	± 6	± 4.1286	± 4.1199	± 4.1590	± 0.0063	± 0.022
0	0	0	0	0	0	0

较大,但此项误差可通过计算机软件进行修正。根据表 1 中的数据,经反复试算,确定修正系数 $C(\varphi)=1.0095$,数据处理时,取 $h'=C(\varphi)h_z$,由(5)式可求出 φ 的测量值,经修正后的摆角测量误差 $\Delta\varphi'_z \leq \pm 0.041^\circ$,由此可知像高经修正后测量精度得到了较大的改善和提高。

5.2 同一视场角不同入射高度光线

从使用角度出发,在光学系统设计时,理想状态下同一视场角不同入射高度的光线在 CCD 像面上的像点重合,但由于实际光学系统存在像差而致使其不重合,如图 7 所示,由此而产生摆角测量误差。

表 2 给出了不同扫描镜摆角或相当于扫描接收光学系统不同视场角情况下,同一视场角的上下 a、b 两条光线在 CCD 像面上的成像位置以及由成像位置不同所产生的摆角测量误差 $h_z、h_b$ 的计算结果。

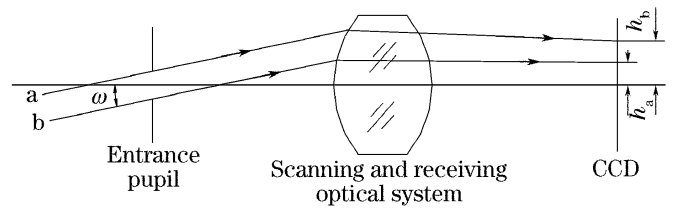


图 7 同一视场角 a、b 两条光线在 CCD 上的像点位置示意图
Fig. 7 Imaging position of rays a and b at CCD imaging plane

表 2 a、b 光线在 CCD 像面上像点位置及摆角测量误差的计算结果

Table 2 Measuring error for the two rays a and b at different swing angle of scanning mirror on the CCD imaging plane

Swing angle of scanning mirror $2\varphi / (^\circ)$	Field of view $\omega / (^\circ)$	h_a / mm	h_b / mm	Deviation between the two rays /mm	Measurement errors $\Delta\varphi / (^\circ)$
± 12	± 24	± 17.2731	± 17.2105	± 0.0626	± 0.0383
± 10	± 20	± 14.2222	± 14.1436	± 0.0786	± 0.0507
± 5	± 10	± 6.9782	± 6.9493	± 0.0289	± 0.0243
± 3	± 6	± 4.1717	± 4.1610	± 0.0107	± 0.0077
0	0	± 0.0002	± 0.0002	± 0.0004	± 0.0003

由表 2 可知,由于光学系统存在像差成像不理想,对同一视场角,由于光线入射高度的不同而产生的摆角测量误差 $\Delta\varphi \leq \pm 0.05^\circ$ 。

综上所述,设计的扫描接收光学系统可满足扫描镜摆角测量范围 $\pm 12^\circ$ 、测量误差 $\pm 0.05^\circ$ 的要求。

6 实验与分析

6.1 系统静态精度测试

用反射镜与光学转台组成测试标定装置,将一块反射镜置于光学转台上,并使反射镜的反射面通过光学转台的回转中心,由光学转台给定某一角度,并将其作为标准值,然后用系统测量该角度,将光学转台的读数与系统的测量值相比较,可得系统的静态测量误差,结果如表 3 所示。

表 3 系统静态精度测试数据与结果

Table 3 Data and results of static measurement accuracy for the system

Angle of positive direction			Angle of negative direction		
Rotation angle / (°)	Measured value / (°)	Error / (°)	Rotation angle / (°)	Measured value / (°)	Error / (°)
0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
1.00	1.03	0.03	-1.00	-1.02	-0.02
3.00	3.01	0.01	-3.00	-2.98	0.02
6.50	6.50	0.00	-6.50	-6.46	0.04
10.00	9.96	-0.04	-10.00	-10.03	-0.03
12.00	12.01	0.01	-12.00	-12.02	-0.02

6.2 系统动态精度测试

用电机驱动电源驱动扫描镜使其摆动,由系统可测出该摆角的峰-峰值读数之差,同时用经纬仪分别读出扫描镜摆动到两个边缘时的角度,此两个角度差即为经纬仪测出的峰峰值读数之差,将两个结果进行对比,两者之差即为系统摆角的动态测试误差,结果如表 4 所示。

表 4 系统动态测试精度数据与结果

Table 4 Data and results of dynamic measurement accuracy for the system

The measured values of the peak values difference of swing angle for its system /($^{\circ}$)	5.95	11.00
The measured values of the peak values difference of swing angle for theodolite /($^{\circ}$)	5.96	11.01
Dynamic measurement error of swing angle /($^{\circ}$)	-0.01	-0.01

6.3 系统的摆角测试曲线

系统的扫描镜零位测试曲线、静态测试曲线和动态测试曲线如图 8~图 10 所示。

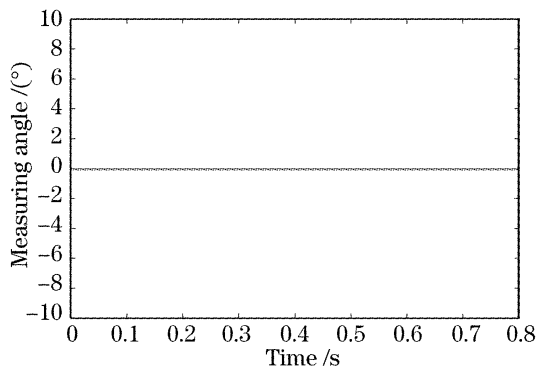


图 8 扫描镜零位测试曲线

Fig. 8 Zero-position measurement curve of scanning mirror

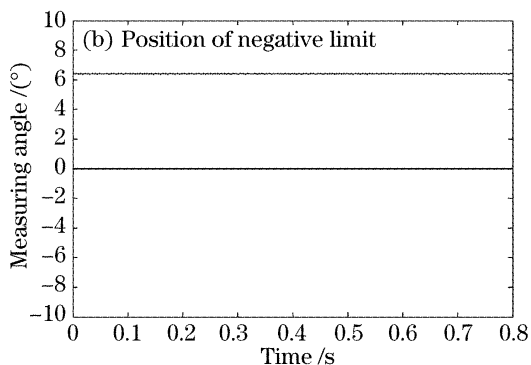
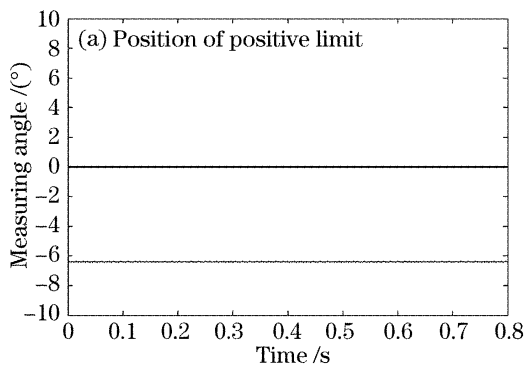


图 9 扫描镜静态测试曲线

Fig. 9 Static measurement curve of scanning mirror

实验结果和测试曲线表明,扫描镜摆角动态测试系统的测量范围为 $0 \sim \pm 12^{\circ}$,分辨力为 0.01° ,动静态测量精度小于 $\pm 0.04^{\circ}$,其与理论分析结果相符。测量系统可打印和显示输出扫描镜摆角与时间的坐标曲线。

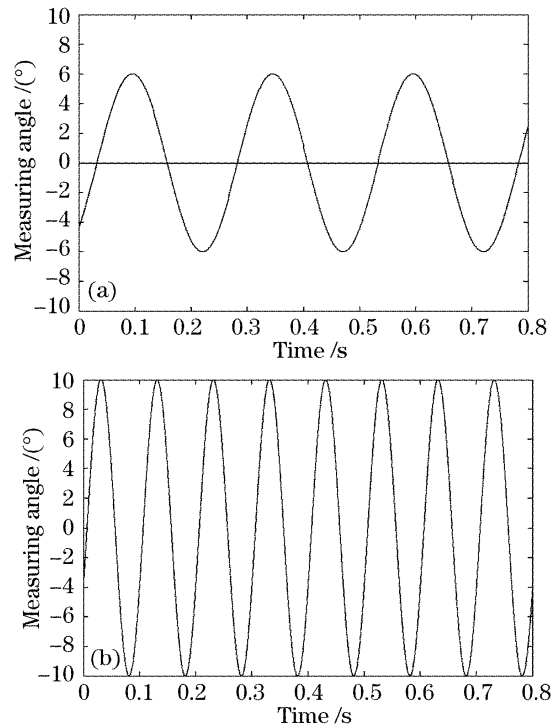
图 10 扫描镜动态测试曲线。(a)频率 4 Hz,角度 $\pm 6.5^{\circ}$,
(b)频率 10 Hz,角度 $\pm 10^{\circ}$

Fig. 10 Dynamic measurement curve of scanning mirror.

(a) Frequency 4 Hz, the angle of limit $\pm 6.5^{\circ}$,(b) frequency 10 Hz, the angle of limit $\pm 10^{\circ}$

7 结 论

提出了一种扫描镜摆角激光动态测试方法,并研制了扫描镜摆角动态测试系统,实现了地球敏感器扫描镜摆角的动、静态激光非接触测量。设计的大视场扫描接收光学系统克服了红外地球敏感器窗口布局 and 尺寸的限制,使测量结果不受入射光位置变化的影响,满足了扫描镜输出摆角的测量要求。为提高测试系统精度,采用了计算机误差补偿与修正技术,通过建立系统误差补偿数学模型,利用软件对系统误差进行修正与补偿或通过标定仪的测量数据,设计相应的软件,对测试系统动静误差进行修正,保证了测试系统精度的要求。

扫描镜摆角动态测试系统的研制,为地球敏感器的应用提供必要的参量,为敏感器扫描镜机电系统设计提供可靠数据。实验结果表明,该测试系统的测量范围为 $0 \sim \pm 12^{\circ}$,分辨力为 0.01° ,动静态测

量精度小于 $\pm 0.04^\circ$ 。

参 考 文 献

- 1 Tu Shancheng, Bao Bairong. *Satellite Posture dynamics and Control* [M]. Beijing: Space Navigation press, 2003. 58~121 (in Chinese)
屠善澄, 鲍百容. 卫星姿态动力学与控制[M]. 北京: 宇航出版社, 2003. 58~121
- 2 Jiang Benhe, Cheng Wenyi, Hu Wenfei *et al.*. Mini-angle measurement using CCD and laser-collimation [J]. *Laser & Infrared*, 1998, **28**(4): 233~235 (in Chinese)
蒋本和, 陈文毅, 胡文斐 等. 用激光准直及 CCD 检测的小角度测量系统[J]. 激光与红外, 1998, **28**(4): 233~235
- 3 Wang Mao. Method to adjust the parameters of error compensation for the angle measurement systems with high accuracy[J]. *J. Apparatus and Instrument*, 2000, **21**(4): 395~398 (in Chinese)
王 茂. 高精度角位置测量系统误差补偿参量调试方法[J]. 仪器仪表学报, 2000, **21**(4): 395~398
- 4 Pu Zhaobang, Tao Wei, Zhang Zhuo. Angle measurement with optical methods[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(2): 168~171 (in Chinese)
浦昭邦, 陶 卫, 张 琢. 角度测量的光学方法[J]. 光学技术, 2002, **28**(2): 168~171
- 5 Tao Wei, Pu Zhaobang, Sun Yunbing. The development of angle measurement technique[J]. *Laser J.*, 2002, **23**(2): 5~7 (in Chinese)
陶 卫, 浦昭邦, 孙运斌. 角度测量技术的发展[J]. 激光杂志, 2002, **23**(2): 5~7
- 6 Xu Qiuzhen, Li Yanfen. A new method to test high-accurate angle[J]. *Optical Technique*, 1993, (1): 42~47 (in Chinese)
许求真, 李艳芬. 一种测量高精度角度误差的新方法[J]. 光学技术, 1993, (1): 42~47
- 7 Wang Jianlin, Hu Xiaotang, Jing Fangshen *et al.*. A study on linear CCD applied to 2D small angular measurement [J]. *Aviation Metrology & Measurement Technology*, 1997, **18**(1): 3~5 (in Chinese)
王建林, 胡小唐, 景芳盛 等. 线阵 CCD 用于二维小角度测量的研究[J]. 航空计测技术, 1997, **18**(1): 3~5
- 8 Pan Zhenwu, Su Li, Tang Quanan. Laser dynamic angle-measuring system[J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(4): 213~215 (in Chinese)
潘珍吾, 苏 力, 汤全安. 激光动态测角系统[J]. 激光技术, 1999, **23**(4): 213~215
- 9 Wang Qidong, Cheng Chunkun. Research on laser dynamic angle measuring system[J]. *J. Photons*, 1995, **24**(1): 68~71 (in Chinese)
王启东, 陈纯坤. 激光动态角度测量系统研究[J]. 光子学报, 1995, **24**(1): 68~71
- 10 Wang Fu, Cheng Shoucheng, Liu Bingqi *et al.*. CCD precision angle-measuring system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, **24**(5): 11~14 (in Chinese)
王 斧, 程守澄, 刘秉琦 等. CCD 精密测角系统[J]. 光电工程, 1997, **24**(5): 11~14
- 11 Jin Chunshui. High precision dynamic angle measuring by means of CCD[J]. *Optical Machine*, 1990, (1): 83~87 (in Chinese)
金春水. 使用 CCD 进行动态高精度角度测量[J]. 光学机械, 1990, (1): 83~87
- 12 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 165~256 (in Chinese)
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 2006. 165~256