

doi: 10.3788/gzxb20124102.0185

成像光谱仪扫描镜运动准确度测量

汪逸群^{1,2}, 颜昌翔¹, 贾平¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:扫描镜的运动准确度直接影响成像光谱仪对地运动补偿效果,为此研制了一套扫描镜运动准确度测试设备对其进行测量.首先分析了扫描镜的运动补偿原理,从理论上给出了运动补偿曲线;随后以 15 m 地面像元分辨率和系统调制传递函数下降 2% 作为依据分别确定了扫描镜的位置和速度准确度要求,列出了扫描镜运动补偿倍数与相对转速误差的关系.基于检定设备 1/3 法则提出了扫描镜运动准确度测试设备技术指标要求,接着以 0.8'' 绝对式光电编码器为核心建立了一套扫描镜运动准确度测试装置,并从测试方法误差和编码器测角误差两方面对测试装置测角和测速准确度进行了详细分析;最后采用研制的测试装置对扫描镜的运动准确度进行了测量试验.试验结果表明扫描镜位置准确度优于 3''±1.2'',4 倍补偿时速度准确度为 5.6%±1.29%,6 倍补偿时速度准确度为 3.85%±1.29%,满足成像光谱仪对扫描镜运动准确度要求.外场成像图像证明本文提出的扫描镜运动准确度测量方法及设备可用于成像光谱仪扫描镜的性能检测与验收.

关键词:准确度测量;运动补偿;光电编码器;成像光谱仪

中图分类号:TH74

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)02-0185-5

0 引言

成像光谱仪是一种“谱像合一”的仪器,它利用狭缝将望远镜和光谱仪有机地结合在一起,将景物像元的光谱分成几十乃至上百个光谱通道,从而使其焦平面阵列探测器每个像元所接收到的能量大为降低,直接导致信噪比严重下降,无法满足应用需求.根据信噪比方程,要获得更高的信噪比,在系统的参数和探测器都确定的情况下,只有通过增加积分时间来实现^[1-5].扫描镜运动补偿是增加积分时间的有效方法之一,高分辨率成像光谱仪(High Resolution Imaging Spectrometer, HIRIS)^[6]、沿海海洋成像光谱仪(Costal Ocean Imaging Spectrometer, COIS)^[7]等成像光谱仪都采用了该方法增加积分时间以提高信噪比.这也是当前焦平面器件帧频限制条件下为获得高分辨率图像不得不采取的措施^[8].

扫描镜的运动误差(包括位置误差和速度误差)会导致地面目标在成像光谱仪像面上产生像移残差,降低系统传函,因此扫描机构必须具有足够的运动准确度.而扫描镜的准确度要求直接决定了其研制成本、发射重量和研制周期,因此有必要从理论上分析运动误差对成像质量的影响,从而提出合理的

扫描镜技术指标要求,并为后期的扫描镜性能检测提供理论指导.在此基础上必须建立一套合理的运动准确度测试设备,对扫描镜准确度指标进行测试,作为扫描镜性能调试依据和产品验收根据.

1 扫描镜运动补偿准确度要求

1.1 扫描镜运动补偿原理

运动补偿原理如图 1.扫描镜与卫星飞行方向成 45° 放置时成像光谱仪将对星下点进行观测,在卫星平台位于 1 位置时将扫描镜转动 $\alpha/2$ 角,使瞬时视场光轴沿飞行方向前摆 α 角指向星下点 B_1 前方的 D_1 点,然后控制扫描镜按一定规律转动,使光轴逆飞行方向相对卫星平台后摆,到 3 位置完成一次运动补偿.然后再迅速调整扫描镜,使光轴由 C_1

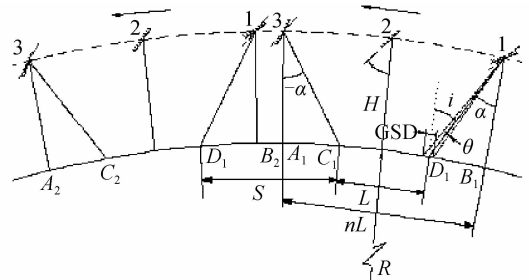


图 1 运动补偿示意图

Fig. 1 Sketch map of motion compensation

基金项目:国防预研基金(No. O5001SA050)资助

第一作者:汪逸群(1983-),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为空间精密扫描机构设计与检测. Email: hitwyq@yahoo. com. cn

导师:贾平(1964-),男,研究员,博士,主要研究方向为航空成像与测量仪器技术. Email:jiap@ciomp. ac. cn

收稿日期:2011-03-01;修回日期:2011-04-19

点指向 B_1 点,进行下一次运动补偿.若平台由 1 位置飞行到 3 位置对应的星下点距离为 $A_1B_1 = nL$,对应的地面观测距离 $C_1D_1 = L$,则相对于不作运动补偿情况,探测器对目标区域 C_1D_1 的积分时间增大为 n 倍.

结合卫星飞行参量,推导出扫描镜运动补偿曲线如图 2.扫描镜应严格按理论曲线所示的位置及对应的角速度运动,实现像移补偿;否则,在成像光谱仪焦平面上就会产生像移匹配误差,降低系统传函.然而,理想的扫描镜是不存在的,有必要对扫描镜所需的运动准确度进行理论分析,以便给出合理的性能指标要求,并为扫描镜验收提供理论指导.

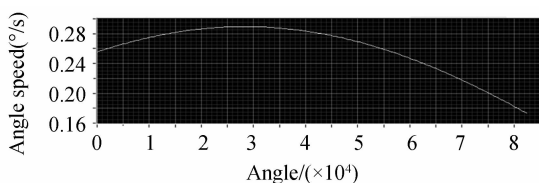


图 2 扫描镜运动补偿理论曲线

Fig. 2 Motion compensation curve of scanning mirror

1.2 扫描镜运动补偿准确度要求的确定

扫描镜的运动补偿准确度包括位置准确度和速度准确度两部分,根据成像光谱仪对扫描镜的功能需求可以分别确定这两方面的要求.

扫描镜的位置准确度要求取决于成像光谱仪地面像元分辨率,假设地面像元分辨率为 15 m,卫星轨道高度为 600 km,可以将地面像元分辨率转换为入射至扫描镜表面光线的转角

$$\Delta\alpha = \frac{\delta}{H} = \frac{15}{600 \times 1000} = 5$$

式中: $\Delta\alpha$ 为地面像元分辨率对应的入射光线转角; δ 为地面像元分辨率; H 为卫星轨道高度(600 km).

根据几何光学知识,扫描镜转动 α 角,则反射光线将有 2α 摆角.也就是说,在成像光谱仪对地面成像时,扫描镜转动 $2.5''$,地面景物就移动一个像元,因此扫描镜的位置准确度应优于 $2.5''$.

扫描镜的速度准确度直接影响成像光谱仪的成像质量,成像质量的优劣一般用整个系统的调制传递函数数值 MTF 来评价.成像系统包括地面目标、大气、扫描镜、光学系统、像移、CCD、电子线路等各子系统.系统总的 MTF 等于各子系统的 MTF 之积.其中扫描镜的 MTF 要根据扫描镜运动误差造成的像移速度匹配误差进行计算^[9].

根据光学系统的焦距可以计算出扫描镜运动误差与像移速度匹配误差间的关系.定义 v 为无扫描镜补偿时地物在 CCD 上的像移速度, t_e 为无扫描镜补偿时 CCD 的曝光时间, v_p 为扫描镜进行 n 倍补偿时地物在 CCD 上的像移速度, nt_e 为扫描镜补偿

时 CCD 的曝光时间, v_c 是由于扫描镜运动引起的地物在 CCD 上像移速度, Δv_p 是像移速度匹配残差.显然有

$$v_p = v - v_c = \frac{v}{n} \quad (1)$$

设光学系统焦距为 f ,扫描镜理论转速为 ω ,其转速误差为 $\Delta\omega$,可得

$$v_c = 2f\omega = \frac{n-1}{n}v \quad (2)$$

综合式(1)和式(2)得

$$v_p + \Delta v_p = v - 2f(\omega + \Delta\omega),$$

即扫描镜的转速误差与像移速度匹配残差的关系为

$$\Delta v_p = 2f\Delta\omega \quad (3)$$

也就是说扫描镜的转速误差与像移匹配误差成线性关系,所以扫描镜的转速波动形式直接决定了像移速度匹配残差的运动形式.

扫描镜由有限转角力矩电机直接驱动,采用电流环、速度环和位置环的三环控制方法.通过电流环控制电磁力矩(加速度),进而通过速度环控制电机转速(使转速符合图 2 所示要求),通过位置环控制位置准确度.它的转速波动主要受摩擦力矩、电机力矩波动、角度传感器重复测量误差和电路噪声误差的影响.其中摩擦力矩和电机力矩波动造成的转速波动周期均较长(远大于曝光时间 10 ms),而后两者的影响量较小,因此认为在曝光时间 t_e 内扫描镜速度波动造成的像移运动属于线性运动,线性运动的像移调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 可用下式求得^[10]

$$\text{MTF}(N) = \frac{\sin(\pi a N)}{\pi a N} \quad (4)$$

式中: a 为像移移动量; N 为频率空间.

设 CCD 像元大小为 d ,则 CCD 奈奎斯特频率 $N = 1/2d$,像移移动量 $a = \Delta v_p t_e = sd$ ($0 < s < 1$),其中 s 为相对像移移动量.图 3 是曝光时间 t_e 内相对像移移动量 s ($0 < s < 1$) 对 MTF 的影响.

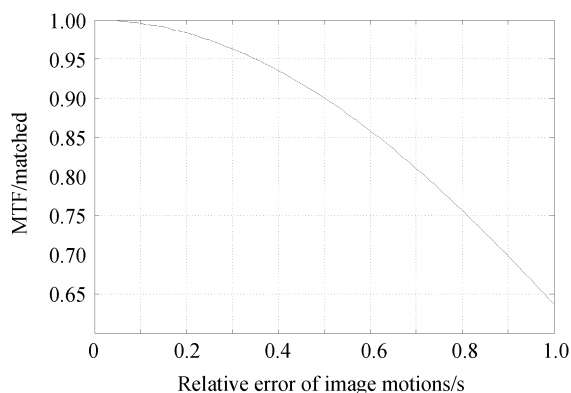


图 3 调制传递函数与相对像移移动量的关系

Fig. 3 Relationship between MTF and relative image motion

为使成像光谱仪具有较高的 MTF,必须使扫描镜的运动误差影响的像移速度匹配误差控制在一定范围内. MTF 下降 2%(根据总体指标要求确定)对成像质量无本质影响,可以作为像移速度匹配误差的计算约束. 经过计算,对于成像光谱仪而言,MTF 下降 2%时的相对像移移动量 $s=0.2$.

为了获得 Nyquist 频率下较高的 MTF,要求扫描镜转速误差造成的像移移动量

$$a = \Delta v_p n t_c = 2f \Delta \omega n t_c = \frac{\Delta \omega n - 1}{\omega} v n \frac{d}{v} \leq 0.2d$$

故扫描镜的相对转速误差

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} \leq \frac{0.2}{n-1} \tag{5}$$

因此对于不同的运动补偿倍数,就得到对应的扫描镜相对转速允差.

表 1 扫描镜运动补偿倍数与相对转速误差的关系

Table 1 Relationship between motion compensation and relative rotation error of scanning mirror

n	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta\omega/\omega$	20%	10%	6.7%	5%	4%	3.3%	2.9%

2 扫描镜运动准确度测试设备

2.1 扫描镜运动准确度测试设备准确度要求

根据第 1.2 节的分析结论,扫描镜的位置准确度要求优于 $2.5''$,根据检定设备的 1/3 法则,要求扫描镜运动准确度测试设备的测角准确度优于 $0.8''$. 结合 CCD 的帧频速率,扫描镜的运动补偿倍数取 4 倍或 6 倍,在 6 倍补偿时,对扫描镜的速度准确度要求较高,本文仅针对这种工况条件进行分析. 此时扫描镜的速度准确度要求为 4%(转速为 $0.2^\circ/s$),速度的绝对误差应小于 $28.8''/s$,同样基于 1/3 法则可知,测试设备的测速准确度应优于 $9.6''/s$.

2.2 扫描镜运动准确度测试设备方案

根据测试设备技术指标要求,决定选用 24 位绝对式光电轴角编码器作为测试设备的测角元件,其测角准确度 $\delta=0.8''$. 围绕该编码器建立的测试设备方案框图如图 4.

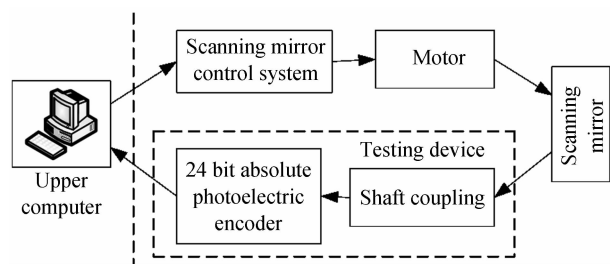


图 4 测试设备方案框图
Fig. 4 Scheme of testing device

图 4 中扫描镜控制系统、电机和扫描镜构成被检测设备,24 位绝对式编码器和联轴器组成测试设

备,上位机通过串行接口分别与测试系统和控制系统进行通信.

具体的测试方法是光电编码器的输入轴与扫描镜的旋转轴通过高准确度联轴器联接,扫描镜与光电编码器同步转动,编码器实时向上位机发送扫描镜角位置信息. 为了测量准确,在扫描镜控制系统发出运动命令的同时给测试设备发送一个同步检测信号,测试设备以此刻为起始点开始采集数据,编码器发出的信号通过细分及 A/D 转换系统被细分并转换为数字信号,然后进入到数据接收及处理系统,处理系统对数据进行运算分析给出实测的角度-速度曲线,通过与输入的理论曲线进行比较分析,得到扫描镜的位置和速度误差. 测试过程如图 5.

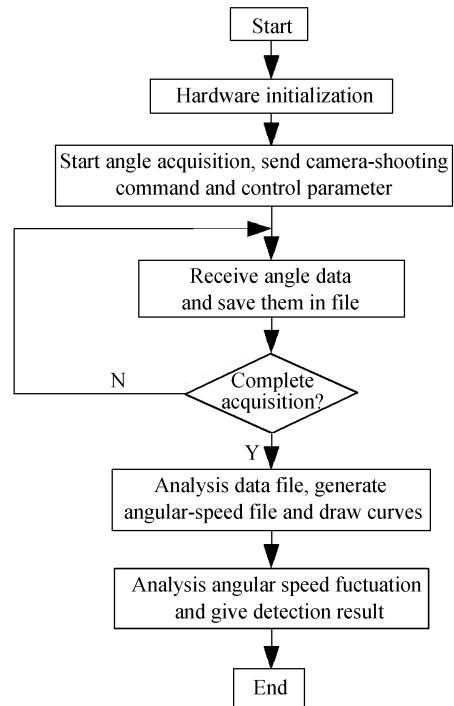


图 5 测试流程
Fig. 5 Flow chart of testing process

主要包含硬件系统的初始化、数据采集及数据分析处理三个过程.

2.3 扫描镜运动准确度测试设备准确度分析

扫描镜运动准确度测试设备的位置检测准确度主要由光电编码器的测角准确度决定,该编码器测角准确度为 $0.8''$,可以满足扫描镜位置准确度的检测需求.

影响测试设备测速误差的因素较多,主要包括测量方法引起的误差、编码器自身测角误差、控制主机的计时误差及其他噪音引起的误差(包括联轴器引起的传递误差、光学测试平台振动引起的测量误差和环境因素影响引起的误差等). 其中后两项造成的测速误差很小,可以忽略不计,仅就前两项误差作详细分析.

绝对式光电编码器不能直接获取扫描镜的角速度,而是利用中心差分的方法求取角速度.中心差分表达式及截断误差表达式为

$$\omega = \theta'(t) \approx \frac{\theta(t+T/2) - \theta(t-T/2)}{T} \quad (6)$$

$$R(t) = \theta'(t) - \frac{\theta(t+T/2) - \theta(t-T/2)}{T} = \frac{T^2}{24} \theta'''(\xi) \quad (7)$$

由扫描镜的运动补偿曲线经2次求导可以得到扫描镜在补偿过程中角加速度变化率曲线,如图6.

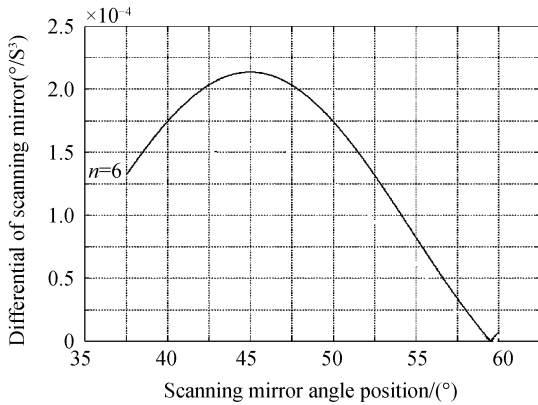


图6 扫描镜6倍补偿过程中 $|\theta'''(\xi)|$ 曲线
Fig. 6 $|\theta'''(\xi)|$ curve when scanning mirror 6 times motion compensation

取 $|\theta'''(\xi)|_{\max} = (2.125 \times 10^{-4})^\circ/\text{s}^3$,则

$$|R(t)| \leq (0.89T^2 \times 10^{-5})^\circ/\text{s}$$

可以看出当 $T \leq 1\text{s}$ 时,中心差分的截断误差很小,因此由测速方法引起的误差可以忽略不计.

编码器自身测角误差带来的测速误差可以利用函数随机误差的计算公式求得

$$\sigma_\omega = \sqrt{\left[\frac{\partial \theta'(t)}{\partial \theta(t+T/2)} \right]^2 \sigma_{\theta(t+T/2)}^2 + \left[\frac{\partial \theta'(t)}{\partial \theta(t-T/2)} \right]^2 \sigma_{\theta(t-T/2)}^2} \quad (8)$$

由于计时误差几乎为零, T 可以看作常量,编码器的测角准确度 δ 是随机的,则函数传递误差可表示为

$$\sigma_\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{T}\right)^2 \sigma_{\theta(t+T/2)}^2 + \left(\frac{1}{T}\right)^2 \sigma_{\theta(t-T/2)}^2} = \frac{\sqrt{2}\delta}{T}$$

综上,编码器测角误差引起的测速误差为

$$\sigma = \sigma_\omega = \frac{\sqrt{2}\delta}{T}$$

式中, $\delta = 0.8''$ 是编码器的测角准确度, T 为角位移的采样时间间隔.根据扫描镜测速准确度要求,测试

设备的速度检测准确度要求达到 $9.6''/\text{s}$,即 $\sigma \leq 9.6''/\text{s}$,则要使测试设备的测速准确度满足扫描镜的检测要求,应有 $T \geq 0.12\text{s}$.在本测试设备中取 $T = 0.12\text{s}$,此时测试设备测速准确度为 $9.4''/\text{s}$,满足扫描镜测速准确度要求.

3 扫描镜运动准确度测试试验

如图7(a)和7(b)分别是扫描镜进行 $n=4$ 倍和 $n=6$ 倍运动补偿时的实际角度-角速度曲线.由曲线图可知,在运动补偿过程中,扫描镜实际角速度变化趋势与理论角速度变化规律一致,但是存在一定的速度波动量.测试结果表明扫描镜位置准确度为 $3'' \pm 1.2''$,4倍补偿时速度准确度为 $5.6\% \pm 1.29\%$,而6倍补偿时速度准确度为 $3.85\% \pm 1.29\%$,可以满足成像光谱仪运动补偿成像要求.

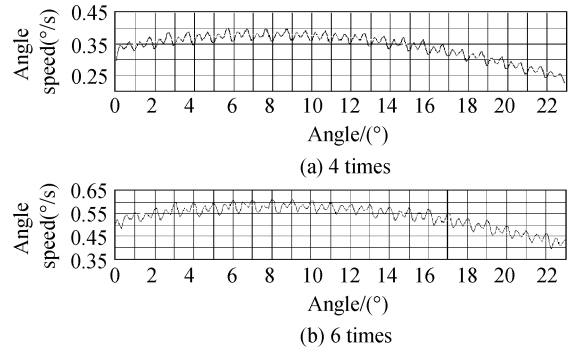


图7 4倍和6倍运动补偿时角度-角速度测试曲线
Fig. 7 The angle-angle speed testing curves of 4 times and 6 times motion compensation

4 结论

本文首先介绍了扫描镜运动补偿原理,然后从理论上分析了成像光谱仪对扫描镜运动准确度的指标要求.接着以分析结果作为依据确定了扫描镜运动准确度测试设备的准确度要求,并建立了一套围绕24位绝对式光电轴角编码器的扫描镜运动准确度测试设备,通过误差分析得到测试设备测量准确度满足测试要求的结论.最后采用研制成功的扫描镜运动准确度测试设备对扫描镜的运动准确度进行了测试,测试结果表明扫描镜位置准确度优于 $3'' \pm 1.2''$,4倍补偿时速度准确度为 $5.6\% \pm 1.29\%$,6倍补偿时速度准确度为 $3.85\% \pm 1.29\%$,满足成像光谱仪对扫描镜运动准确度要求.目前该扫描镜已成功应用于某型成像光谱仪中,取得了良好的外场成像效果,表明本测试设备可以用于扫描镜的指标测试和验收工作.

参考文献

- [1] ECKARDT A, SKRBK W, HOFER S, *et al.* SNR estimation for advanced hyperspectral space instrument[C]. *SPIE*, 2005, **5883**: 1-7.
- [2] SELLAR R G, BOREMAN G D. Comparison of relative signal-to-noise ratios of different classes of imaging spectrometer[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(9): 1614-1624.
- [3] NIEKE J, SOLBRIG M, NEUMANN A. Noise contributions for imaging spectrometers [J]. *Applied Optics*, 1999, **38** (24): 5191-5194.
- [4] SCHUMANN L W, LOMHEIM T S. Infrared hyperspectral imaging fourier transform and dispersive spectrometers; comparison of signal-to-noise based performance[C]. *SPIE*, 2002, **4480**: 1.
- [5] LI Huan, XIANG Yang, FENG Yu-tao. Ground resolution for imaging spectrometer with motion compensation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(4): 745-747.
李欢,向阳,冯玉涛.运动补偿成像光谱仪的地面分辨率[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(4): 745-747.
- [6] LI You-ping, YU Bing-xi, HAN Chang-yuan, *et al.* Tradeoff optimization design of optical configuration on imaging spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14** (6): 975-976.
李幼平,禹秉熙,韩昌元,等.成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(6): 975-976.
- [7] PEARLMAN J, SEGAL C, LIAO L. Development and operation of the EO-1 hyperion imaging spectrometer [C]. *SPIE*, 2004, **4135**: 243-253.
- [8] FENG Yu-tao, XIANG Yang, CHEN Xu. The characteristics of spectral radiance measured by imaging spectrometer with motion compensation [J]. *Infrared Technology*, 2009, **31** (2): 107-109.
冯玉涛,向阳,陈旭.运动补偿下短波红外成像光谱仪的信噪比特性[J]. *红外技术*, 2009, **31**(2): 107-109.
- [9] YAN De-jie, HAN Cheng-shan, LI Wei-xiong. Optimization design of scroll and pitch and their control errors on aircraft [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(9): 2226-2227.
闫得杰,韩诚山,李伟雄.飞行器侧摆和前后摆及控制误差得优化设计[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(9): 2226-2227.
- [10] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究生部教材, 2003: 57-58.

Motion Precision Measurement of Imaging Spectrometer's Scanning Mirror

WANG Yi-qun, YAN Chang-xiang, JIA Ping

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Motion precision of scanning mirror is vital for motion compensation results of imaging spectrometer. So a set of scanning mirror testing equipment was developed to test scanning mirror's motion precision. Firstly, the motion compensation principle was analyzed and the theory motion compensation curve was given. Then according to 15 m GSD and 2% degradation of system MTF, the scanning mirror's position and speed precision target was confirmed. At the same time the relationship between motion compensation times and relative rotation error was outlined. Based on 1/3 principle, the guide line of scanning mirror's motion precision testing equipment was proposed. In succession a set of testing equipment found on 0.8" absolute optoelectronic encoder was established. The testing precision of testing equipment was analyzed carefully from the testing method error and the encoder's error aspects. Finally, scanning mirror's motion precision testing experimentation was carried out by the testing equipment. The testing results indicate that the scanning mirror's position precision is better than $3'' \pm 1.2''$, speed precision is $5.6\% \pm 1.29\%$ when 4 times compensation and $3.85\% \pm 1.29\%$ when 6 times compensation. These precision results meet the requirements of imaging spectrometer for scanning mirror. Favorable imaging property of the imaging spectrometer proves that the proposed testing method and equipment is suitable for scanning mirror's check and accept.

Key words: Precision measurement; Motion compensation; Optoelectronic encoder; Imaging spectrometer