

文章编号 1004-924X(2014)04-0850-06

非接触式扫描反射镜转角测量系统

王 洋^{1,2}, 颜昌翔^{1*}, 胡春晖¹, 汪逸群¹, 顾志远^{1,2}, 张 达¹, 张新洁¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高扫描反射镜转角检测系统的测角范围, 建立了基于一字线激光器和线阵 CCD 的高精度非接触式扫描镜角度检测系统。介绍了检测系统的结构和工作原理, 该系统根据激光光斑在 CCD 上的位置计算扫描反射镜的转角, 并利用特殊设计的阵列反射镜增大测角范围。为了降低对加工及装调精度的要求, 对系统进行了误差分析, 给出了采用多项式拟合法进行角度测量的理论依据。讨论了影响系统检测精度的一系列误差源, 计算了系统测量的总误差。最后进行了相关的测量实验。实验结果表明: 系统的检测系统分辨率为 2.5", 测角范围为 11°, 测角精度可达 3", 可以满足扫描反射镜对角度测量系统提出的高精度、非接触、大测角范围的要求。

关键词: 光谱成像仪; 扫描镜; 非接触测量; 角度测量; 多项式拟合; 误差分析

中图分类号: TP731; TB92 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142204.0850

Non-contact rotation angle measurement system for scanning mirrors

WANG Yang^{1,2}, YAN Chang-xiang^{1*}, HU Chun-hui¹, WANG Yi-qun¹,
GU Zhi-yuan^{1,2}, ZHANG Da¹, ZHANG Xin-jie¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
- * Corresponding author, E-mail: yan cx@ciomp. ac. cn

Abstract: A non-contact rotation angle measurement system based on a line laser, and a linear array CCD was established to extent the angle measuring scope of a scanning mirror. The structure and measurement principle of the measurement system were introduced. It calculates the rotational angle of the scanning mirror by the position of the laser spot on the linear CCD and extents the measuring scope by array mirrors with special design. To reduce the alignment requirements, the error was analyzed and a calibration measurement method with polynomial fitting was verified. A series of error sources that affect the measurement accuracy were analyzed and the total errors of the measurement system were calculated. Finally, the related measurement experiment was performed. Experimental results indicate that the measurement system can offer a resolution of 2.5", angular measurement range of 11°, and the precision of angular measurement is up to 3". Obtained results can satisfy the

收稿日期: 2013-08-20; 修订日期: 2013-10-07.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2011AA12A103); 中国地质调查局资助项目 (No. 1212011120227)

system requirements for non-contact, higher precision and wider measurement ranges.

Key words: spectroscopic imager; scanning mirror; non-contact measurement; angle measurement; polynomial fitting; error analysis

1 引言

扫描反射镜是超光谱成像仪的关键部件之一,用于对地物进行扫描成像及运动补偿等^[1-2]。扫描反射镜的位置误差和速度误差直接影响超光谱成像仪的成像质量,因此,扫描反射镜的实时动态检测至关重要。而实现扫描反射镜运动特性检测的首要问题是在扫描反射镜转动范围内按其要求的精度进行连续角度测量。目前,常用的高精度角度测量方法多为光学方法,如干涉法、内反射法、自准直法(经纬仪)等,这些方法的测角范围仅有几十秒到几分,无法实现扫描镜测角范围内的高精度测量^[3-5]。环形激光器能实现大测角范围的高精度连续角度测量^[6],但是接触式测量引入的转动惯量会影响扫描反射镜的运动性能,进而带来测量误差。经纬仪对扫描反射镜位置误差的检测精度可达 $3''$,但经纬仪的测角视场为角分级,仅适用于静态测量,无法应用于大测角范围的动态检测^[7-8]。

随着 CCD 技术的高速发展,基于 CCD 的非接触式角度测量的应用越来越多。文献[9]利用激光和 CCD 动态测量扫描反射镜摆角,测量角度为 $-12^{\circ} \sim +12^{\circ}$,分辨力为 0.01° ,不确定度为 0.04° 。基于 CCD 的角度测量技术的测角精度由像元大小和系统焦距决定,测角范围受 CCD 长度的限制,如何利用有限长的 CCD 实现大测角范围内高精度的连续角度测量是目前亟待解决的问题。本文提出了一种基于一字线激光器和线阵 CCD 的高精度非接触式扫描反射镜运动特性检测设备,并对该系统的静态角度测量进行了相关分析与实验。由实验结果可知,该系统的测角精度和测角范围满足扫描反射镜的静态角度测量需求。

2 检测系统的构成及其工作原理

2.1 检测系统的构成

图 1 为扫描反射镜角度检测系统的结构图。它主要由一字线激光器、衰减片、阵列平面反射

镜、线阵 CCD、图像采集子系统及计算机等组成。其中,阵列平面反射镜由 5 块小平面对反射镜通过环氧树脂胶粘接而成,驱动机构驱动被检测的扫描反射镜进行自转。

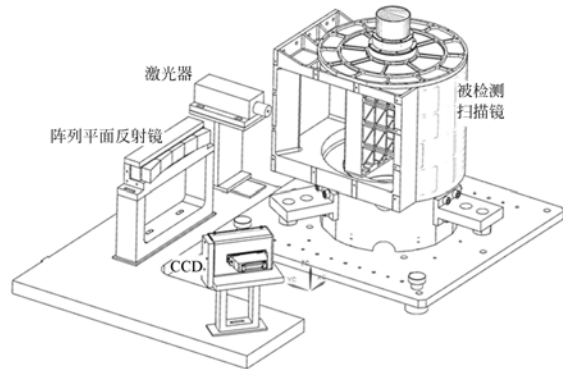


图 1 扫描反射镜角度检测系统结构图

Fig. 1 Scheme of rotation angle measurement system for scanning mirror

2.2 检测系统的工作原理

该系统的工作原理如图 2 所示。假设有一参考椭圆,线阵 CCD 和被检测扫描反射镜分别放于椭圆的两个焦点 F_1, F_2 处,阵列反射镜的每块小反射镜均与参考椭圆相切,且两两相接。系统工作时,一字线激光器发出的长条形平行光经衰减片入射到扫描反射镜上,当扫描反射镜从位置 1 开始逆时针旋转时,CCD 上对应的光斑从 Q_1 端向 Q_2 端移动;当光束由 M_1 过渡到 M_2 时,CCD 上的光斑重新移动至 Q_1 端。这样,随着扫描反

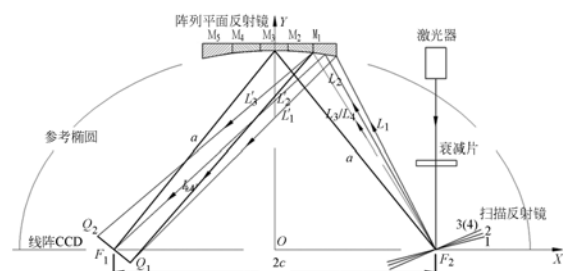


图 2 系统原理图

Fig. 2 Principle scheme of proposed system

射镜的连续转动,经扫描反射镜的反射光束顺次被 $M_1 \sim M_5$ 反射,对应 CCD 上的光斑由 Q_1 端向 Q_5 端移动 5 次。这样就将一个大的角度范围分为 5 个小角度区间,使有限长 CCD 可以复用,从而实现了大测角范围内的高精度角度连续测量。根据 CCD 的积分时间和帧频可进一步计算扫描反射镜的角速度。

根据工程需要,系统设计的测角分辨率 ϵ 为 $2.5''$,由角分辨率计算公式:

$$\epsilon = \frac{u}{2a}, \quad (1)$$

其中: $u = 9 \mu\text{m}$,为线阵 CCD 的像元尺寸, a 为参考椭圆的长轴长度,如图 2 所示。系统的光程为 $2a$,由式(1)计算可得 $2a = 730 \text{ mm}$ 。5 块平面反射镜对应的测角范围为 11° 。

在本系统的指标基础上,通过增大系统光程和选用像元尺寸更小的 CCD 可提高系统分辨率;通过调整阵列反射镜的数量可改变检测系统的测角范围,以适应不同的工程环境。

3 标定测量法

根据检测系统的工作原理,按照光束的传播过程可建立系统的数学模型,根据数学模型即可通过 CCD 光敏面上光斑的位置计算扫描反射镜的角位置。但是这种角度计算方法的精度依赖于系统各元件的精确定位,对系统各元件的加工和装调精度要求很高,尤其是被检测扫描反射镜的定位精度,增加了测角的难度和复杂度。为了解决此问题,本系统采用了角度标定计算方法。该方法利用 Leica 经纬仪标定一个初始角度,然后以此为零点,每隔一定的角度间隔测量扫描反射镜的转角位置,根据角度和光斑位置信息得到角位置-光斑位置关系曲线,利用曲线方程可计算转角范围内的任意角位置,进一步可计算得到扫描反射镜的角速度。

根据系统的数学模型,采用多项式拟合(1~4 次)法计算指向反射镜角位置和 CCD 上光斑位置的关系曲线,包括理论状态和几种含有不同加工、装调误差量的失调状态。用于拟合计算的角位置为测角范围内每隔 $2.5''$ 选取的角度点,对应的光斑位置由数学模型计算。影响系统检测精度的因素主要是系统各元件的装调位置误差,表 1 为计

算时 5 种失调状态下的各元件位置误差的极限误差,表 2 为理想状态和表 1 中 5 种失调状态下,利用不同次数的多项式拟合得到的拟合残差。

表 1 各元件的位置误差

Tab. 1 Position errors of each part in system (mm)

误差状态	激光器	扫描镜	阵列平面反射镜	CCD
1	0.05	0.05	0.05	0.05
2	0.1	0.1	0.1	0.1
3	1	1	1	1
4	5	5	1	1
5	10	10	1	1

表 2 多项式拟合误差

Tab. 2 Errors of polynomial fitting (")

拟合多项式	一次	二次	三次	四次
无误差的 3σ	0.932 7	0.880 6	$2.067 0 \times 10^{-4}$	$1.956 9 \times 10^{-4}$
误差 1 的 3σ	0.933 7	0.880 6	$2.071 2 \times 10^{-4}$	$1.956 9 \times 10^{-4}$
误差 2 的 3σ	0.932 7	0.880 6	$2.066 8 \times 10^{-4}$	$1.956 9 \times 10^{-4}$
误差 3 的 3σ	0.925 5	0.880 4	$2.035 2 \times 10^{-4}$	$1.955 8 \times 10^{-4}$
误差 4 的 3σ	0.924 0	0.880 3	$2.027 8 \times 10^{-4}$	$1.955 4 \times 10^{-4}$
误差 5 的 3σ	0.975 1	0.881 5	$2.291 9 \times 10^{-4}$	$1.962 4 \times 10^{-4}$

由表 1,表 2 可知,系统无论是在理论状态还是在失调状态下,利用三次多项式拟合扫描反射镜的角位置和 CCD 光斑位置的拟合残差对系统精度的影响可以忽略。所以系统检测时,可先在测角范围内,利用经纬仪测量若干角位置,记录其对应的光斑位置,然后通过这些角度点进行三次多项式拟合,得到关于角位置-光斑位置的多项式系数,进一步通过得到的多项式计算转角范围内的任意角位置,最后根据 CCD 的帧频计算出指向反射镜的角速度。

这种标定方法减小了系统加工、装调误差对检测精度的影响,从而降低了系统各元件加工和装调精度的要求,尤其是扫描反射镜定位精度的要求,使系统的测量过程简单易行。

4 误差分析

根据检测系统的工作原理,影响系统检测精度的因素主要有激光器的稳定性、检测环境的振动、CCD 上光的入射方向及光斑位置的计算方法、杂散光以及标定用经纬仪的测量误差。

4.1 像面光斑位置计算

图 3 所示为激光最终入射至线阵 CCD 光敏面时,计算机接收到的视频信号。可以看出,在 CCD 上的光斑有一定尺度,大约覆盖 100 个像元,因而如何得到光斑的精确位置成为保证本系统测量精度的关键。

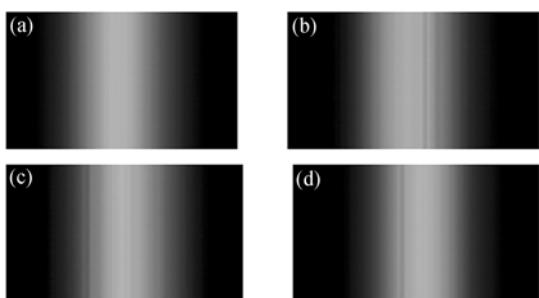


图 3 CCD 上激光光斑图像
Fig. 3 Laser light spots on CCD

标准的视频信号如图 3(a)所示,受各种外界环境因素以及 CCD 响应不均匀性的影响,像面上的光斑能量分布并不是标准的高斯分布,如图 3(b),(c),(d)所示。采用高斯函数构造光斑的一维光强见式(2),横向能量分布如图 4(a)所示。

$$I=500\exp\left(-\frac{x^2}{1600}\right), \quad (2)$$

式中: I 为光强,光斑没有缺陷时像点质心位置为 0,灰度极大值为 500。在标准高斯分布上叠加一系列抛物线函数来表征光斑缺陷,如图 4(b)所示。

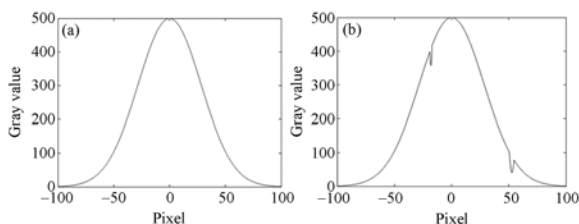


图 4 高斯光束光强分布
Fig. 4 Distributions of Gauss beam intensity

根据实验采集到的图像数据,计算过程中还模拟了含有光强缺陷的光强分布,在此不全部列出。通过计算局部存在缺陷时光斑的位置误差,分析激光光斑对定位精度的影响。

用于计算高斯光束位置的方法主要有对称

法、最大值法、高斯曲线拟合法和重心法。分别采用此计算方法对 5 种含有条纹的激光光斑的位置进行了计算,计算误差如表 3 所示。

表 3 不同计算方法的光斑位置误差

Tab. 3 Position errors with different methods

(pixel)

方法	对称法	最大值法	高斯拟合	重心法
1	0.53	0.55	0.21	0.13
2	0.10	0	0.08	0.05
3	0.05	0.38	0.15	0.19
4	0.32	0	0.21	0.20
5	0.10	0.72	0.10	0.08

由表 3 可知,对称法和最大值法的误差较大,高斯拟合法和重心法的精度较高。高斯拟合法计算比较复杂,而重心法能有效利用光斑全场数据,对光强分布缺陷不敏感,其误差在 0.2 pixel 内,对应的测角误差为 0.5"。此外,重心法具有重复精度高、计算简单、数据量小、对硬件要求低、受外界环境干扰小等优点^[10]。因此,本文最终采用重心法计算光斑位置。

4.2 激光器稳定性测量

激光器刚开始工作时,光束不稳定,CCD 光敏面上光斑会发生漂移,一段时间后才能稳定。在系统工作距离处用激光器直接照射 CCD,根据重心法求得每一行信号的光斑位置,观测光斑的稳定性。

如图 5 所示,激光器开机 20 min 后,光斑稳定,CCD 上光斑重心的漂移量误差为 1/5~1/10 pixel,造成的测角误差为 0.5"。激光器工作 1.5 h 后,因谐振腔发热而造成光束不稳定,所以系统工作的最佳时间是激光器开机后的 20~80 min。

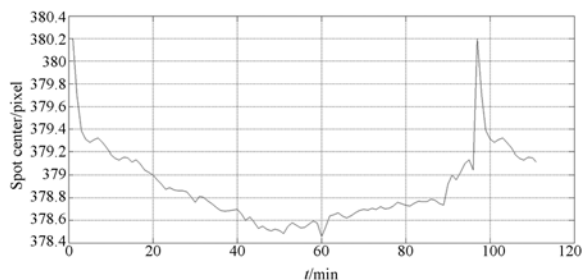


图 5 激光稳定性
Fig. 5 Stability of laser

4.3 光入射方向与 CCD 像元排列方向不垂直的影响

由系统工作原理,在扫描反射镜转动过程中,CCD 的像元排列方向与入射光线不能始终保持垂直关系,而是在一定的角度范围内变化。角度变化得到的重心位置将与垂直入射时的重心位置有所差别。本文利用 Light Tools 模拟高斯光束以不同角度($0\sim 14^\circ$)投射至像面时光斑重心位置的变化,结果如表 4 所示。

表 4 不同角度入射光斑的重心位置

Tab. 4 Position of light spot on CCD (μm)

入射角度/ $^\circ$	重心位置	入射角度/ $^\circ$	重心位置
0	2.30	8	2.33
1	2.30	9	2.33
2	2.30	10	2.34
3	2.31	11	2.35
4	2.31	12	2.36
5	2.31	13	2.37
6	2.32	14	2.38
7	2.32		

由表 4 可以看出,由于不同入射角度造成的光斑偏移量在 $0.1\ \mu\text{m}$ 内,对测量结果的影响可忽略不计。

4.4 误差合成

在检测激光器稳定性时,已考虑实验环境振动的影响;实验时,CCD 的积分时间很短,而环境杂光的光强相对于激光器的光强很弱,可忽略其影响。因此,系统误差包含以下几项:

(1) 线阵 CCD 利用计算机软件可读的最小单位为一个像元,因此 CCD 像元对应的误差 $\Delta_1 = 2.5''$;

(2) 实验标定用经纬仪的测角精度 $\Delta_2 = 1''$;

(3) 激光器的不稳定性误差 $\Delta_3 = 0.5''$;

(4) 利用重心法计算的光斑位置误差 $\Delta_4 = 0.5''$ 。

经过以上分析,利用误差合成原理^[11]得到系统的测角总误差:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2} = 2.78'' \quad (2)$$

5 实验

扫描反射镜静态角度测量系统的实验平台如图 6 所示。

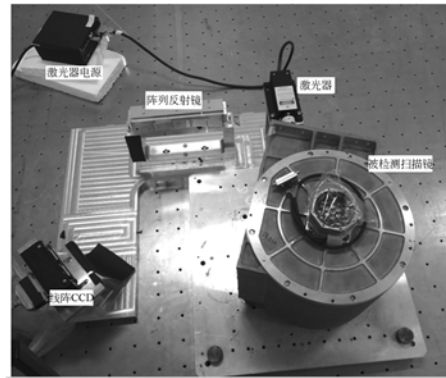


图 6 系统实验结构图

Fig. 6 Photo of rotation angle measurement system

在阵列反射镜中一块平面反射镜对应的测角范围内,利用 Leica 经纬仪测得 50 组角位置信息,记录每组角位置的光斑位置信息,通过重心法计算光斑重心位置。利用 50 组数据中的 30 组数据进行拟合计算,得到角度-光斑位置的三次多项式,再利用其余 20 组数据验证本系统的测角精度。表 5 为 20 组数据的验证结果。

表 5 角度测量结果

Tab. 5 Results of angle measurement ($''$)

序号	误差	序号	误差
1	0.98	11	2.12
2	1.16	12	-0.53
3	-0.15	13	0.27
4	-0.99	14	0.35
5	-0.31	15	0.93
6	-0.14	16	0.85
7	0.18	17	1.15
8	-0.46	18	1.36
9	-1.29	19	0.22
10	-2.00	20	0.45

由表 5 可得,20 组数据的 3 倍标准差为 $3''$ 。所以,检测系统的测角分辨率为 $2.5''$,测角范围为 11° ,测角精度为 $3''$ 。

6 结论

为了实现扫描反射镜转角的大范围、高精度检测,本文提出了一种非接触式扫描反射镜角度检测方法。介绍了检测系统的结构和工作原理,给出了采用多项式拟合法进行角度测量的理论依

据及数据处理方法,并详细分析了影响系统检测精度的误差源。静态测角实验结果显示,系统的分辨率为 $2.5''$,测角范围为 11° ,测角精度可达 $3''$,基本满足扫描反射镜角度测量系统的要求。

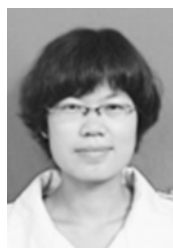
参考文献:

- [1] YUAN L, GAO W J, W SH T. Research on design and manufacture of space remote sensor's big lighten scan mirror [J]. *Advanced Optical Manufacture and Testing Technology, Proceeding of SPIE*, 2000.
- [2] 陈伟,丁亚林,惠守文,等.碳化硅扫描反射镜支撑结构设计[J]. *中国光学*, 2012,5(2):161-166.
CHEN W, DING Y L, HUI SH W. Design of kinematic mount for SiC scanning mirror [J]. *Chinese Optics*, 2012,5(2):161-166. (in Chinese)
- [3] HUANG P S, KIYONO S, KAMADA O. Angle measurement based on the internal-reflection effect: a new method[J]. *Appl. Opt.*, 1992,31:6047-6055.
- [4] MASROOR I, GHAZANFAR H. Michelson interferometer for precision angle measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1999,1:113-120.
- [5] 蒋作民,武晋燮,庄志涛.角度测量[M].北京:机械工业出版社,1995.
JIANG Z M, WU J X, ZHUANG ZH T. *Angle Measurement* [M]. Beijing: Publishing House of Mechanism Industry, 1995. (in Chinese)
- [6] FILATOV Y V, LOUKIANOV DP, PROBSE R. Dynamic angle measurement by means of a ring laser [J]. *Metrologia*, 1997,34:343-351.
- [7] KRISHNA R. Improved pointing accuracy using high precision theodolite measurements[J]. *SPIE*,

实现静态角度测量后,可进一步实现非接触式扫描反射镜大测角范围内的动态特性检测。随着空间低速扫描机构的广泛应用,本检测系统对于研制高质量低速的扫描机构具有重要价值。

- 1996, 2812: 199-209.
- [8] 汪逸群,颜昌翔,贾平.非接触式扫描反射镜定位精度检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2012,41(4):1057-1060.
WANG Y Q, YAN CH X, JIA P. Non-contact position precision detecting method of scanning mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4):1057-1060. (in Chinese)
- [9] 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): 875-880.
ZHANG G Y, JIANG H L, XU X P, et al.. Laser dynamic testing method for swing angle of scanning mirror of infrared earth sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 875-880. (in Chinese)
- [10] 陈青山,吕乃光,燕毕西,等.激光准直高斯光斑中心位置计算方法分析[J]. *计算机测量与控制*, 2004,12(5): 486-488.
CHEN Q SH, LÜ N G, YAN B X, et al.. Analysis to the methods for calculating the center position of Gaussian-distributed beam spot adopted in a laser alignment system [J]. *Computer Measurement & Control*, 2004,12(5):486-488. (in Chinese)
- [11] 毛英泰.误差理论与精度分析[M].北京:国防工业出版社.
MAO Y T. *Theory of Error and Precision Analysis* [M]. Beijing: National Defense Industry Press. (in Chinese)

作者简介:



王洋(1986—),女,吉林长春人,博士研究生,2005年于长春理工大学获得学士学位,主要从事精密角度测量及光机系统设计的研究。E-mail: wangyang11.17@163.com

导师简介:



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,研究员,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感技术等方面的研究。E-mail: yanxc@ciomp.ac.cn