

非接触式指向反射镜检测系统的误差分析

王 洋^{1,2} 颜昌翔¹ 张 达¹ 汪逸群¹ 高志良¹ 刘栋斌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 为检测超光谱成像仪指向反射镜的运动特性,设计了一种非接触式指向反射镜运动特性检测系统,在系统加工、装配前,分析各误差源对系统不确定度的影响,制定系统的误差分配方案。采用齐次坐标建立含有加工、装调误差的数学模型,通过曲线拟合得到指向反射镜转角和光斑中心位置关系曲线,依据相对位置测量误差进行误差分配,降低了加工、装调的要求,确定了系统的误差分配方案,保证指向反射镜在 11° 转角范围内系统不确定度小于 $2''$,分辨率为 $0.5''$ 。提出的误差分配方案大大降低了系统加工、装调难度,验证了系统设计方案的可行性。

关键词 测量;误差分配;坐标变换;指向反射镜;蒙特卡罗法;曲线拟合

中图分类号 O241.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1012001

Error Analysis for the Non-Contact Measuring System of Pointing Mirror

Wang Yang^{1,2} Yan Changxiang¹ Zhang Da¹ Wang Yiqun¹ Gao Zhiliang¹ Liu Dongbin¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to measure the motion characteristics of the pointing mirror of the hyperspectral imager, a non-contact measuring system of the pointing mirror is designed. Before processing and aligning, it is extremely necessary to make an error distribution scheme according to the system's uncertainty which is impacted by various error sources in processing and aligning. The mathematical model with errors of processing and aligning is established via the homogeneous coordinate. The curve of rotation angle and spot position is obtained by curve fitting. The error distribution scheme is determined based on the error of relative position measurement. The error distribution scheme ensures that the measurement uncertainty is $2''$ and the resolution is $0.5''$ in 11° measurement range. The error distribution scheme reduces the accuracy requirements of processing and aligning and validates the feasibility of the system design.

Key words measurement; error distribution; coordinate transformation; pointing mirror; Monte Carlo method; curve fitting

OCIS codes 120.5800; 280.7250; 120.7250; 230.4040; 230.0040

1 引 言

指向反射镜是超光谱成像仪的关键部件之一,可用于对地物的运动补偿。指向反射镜的位置误差和速度误差将导致图像分辨率下降,出现变形和扭曲,直接影响超光谱成像仪的成像质量。为获取高质量的图像,指向反射镜的实时动态检测至关重要^[1]。

文献[2]采用接触式测量方法,将光电编码器的输入轴与指向反射镜的旋转轴以联轴器连接,通过编码器测量角位置信息,其引入的转动惯量会影响指向反射镜的运动性能,进而带来测量误差;高精度经纬仪对指向反射镜位置误差的检测精度可达 $3''$,但经纬仪测角视场为角分级,仅适于静态测量,无法

收稿日期: 2013-01-05; 收到修改稿日期: 2013-02-25

基金项目: 国家 863 计划(2011AA12A103)、中国地质调查局工作项目(1212011120227)

作者简介: 王 洋(1986—),女,博士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: wangyang11.17@163.com

导师简介: 颜昌翔(1973—),男,博士,研究员,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yan cx@ciomp.ac.cn

(通信联系人)

应用于大测角范围的动态检测^[3-4];文献[5]扫描镜摆角动态测试系统利用激光和 CCD 测量指向反射镜摆角,测量范围为 $0^\circ \sim \pm 12^\circ$,分辨力为 0.01° ,不确定度为 $0.04''$;文献[6]采用 $f-\theta$ 透镜和位置敏感探测器(PSD)实现高频摆镜的摆角测量,测角范围为 12° ,不确定度为 $16''$ 。文献[5-6]的检测系统虽然有大测角范围,但是检测精度不高。文献[7]提供了一种动态自准直检测方法,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,利用高精度的自准直测角,通过跟踪误差反映扫描镜的运动性能,需要高精度的自准直仪和精密转台。为解决目前非接触式指向反射镜运动特性检测设备无法同时实现大测角范围和高精度检测的问题,研制了一种测角范围为 11° 、分辨率为 $0.5''$ 、不确定度为 $2''$ 、基于一字线激光器和线阵 CCD 的高精度非接触式指向反射镜运动特性检测系统。为使系

统达到预期目标,在系统设计过程中,对加工、装调误差进行定量的误差分析是极为必要的。

本文对所设计的系统建立含有加工、装调误差的数学模型,分析误差状态下的测量精度,对比依据指向反射镜绝对位置测量误差和相对位置测量误差的误差分配方案,最终确定了系统加工、装调误差分配方案,保证系统不确定度小于 $2''$ 。

2 系统原理介绍

本检测系统由固定基座、一字线激光器、衰减片、阵列平面反射镜、线阵 CCD 组件和计算机实时控制与数据处理系统组成,系统原理如图 1 所示,受椭圆性质启发,由椭圆焦点发出的光线经椭圆边界反射后至椭圆的另一个焦点,设计了一个由一系列平面反射镜构成的阵列平面反射镜。图 2 为系统结构图,箭头 K 方向为一字线激光扩展方向。

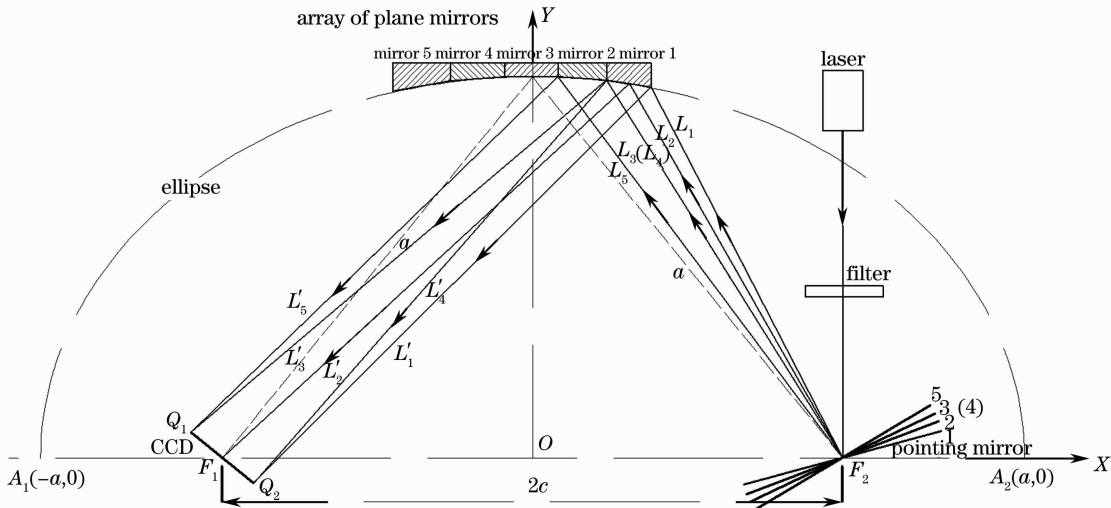


图 1 系统原理图

Fig. 1 Principle scheme of the system

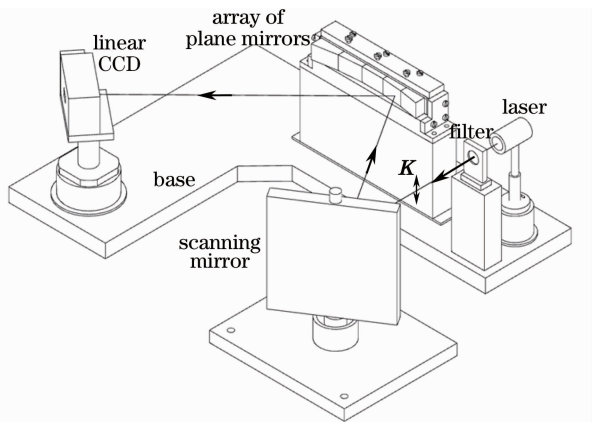


图 2 系统结构图

Fig. 2 Basic configuration of measuring system

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指向反射镜上,当指向反射镜从位置 1 开始逆时针旋转时,经指向反射镜的反射光束顺次被反射镜 1~5 反射。由于阵列反射镜的每片反射镜设计与参考椭圆相切的位置,而且将 CCD 和指向反射镜安放于椭圆两焦点位置,所以对于每块反射镜,经其反射的光线与 CCD 的交点都将从 Q_2 端向 Q_1 端移动。这样就达到了将一个大的角度范围分为 5 个小角度区间,实现有限长的 CCD 复用的目的。

系统分辨率为

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

式中 $u=9\ \mu\text{m}$ 为线阵 CCD 像元尺寸, ϵ 为系统的分辨率, $2a=730\ \text{mm}$ 为系统光程。

图像处理时采用 5 倍细分, 最终实现系统分辨率为 $0.5''$ 。指向反射镜任意时刻位置偏离起始位置的角度 θ 可通过线阵 CCD 像面光斑中心位置与角度 θ 的数学模型求得, 根据 CCD 的积分时间和帧频可计算指向反射镜的转速。由五块平面反射镜构成的阵列平面反射镜重复利用一片线阵 CCD, 与以

往利用 CCD 的测角系统相比, 增大了系统测角范围, 同时保证了精度, 最终实现了在大角度范围内, 指向反射镜运动特性的高精度非接触式连续测量。

3 坐标系定义及数学模型

3.1 坐标系定义

根据图 1, 建立角坐标系如图 3 所示, 图中所有的坐标系均采用右手坐标系。

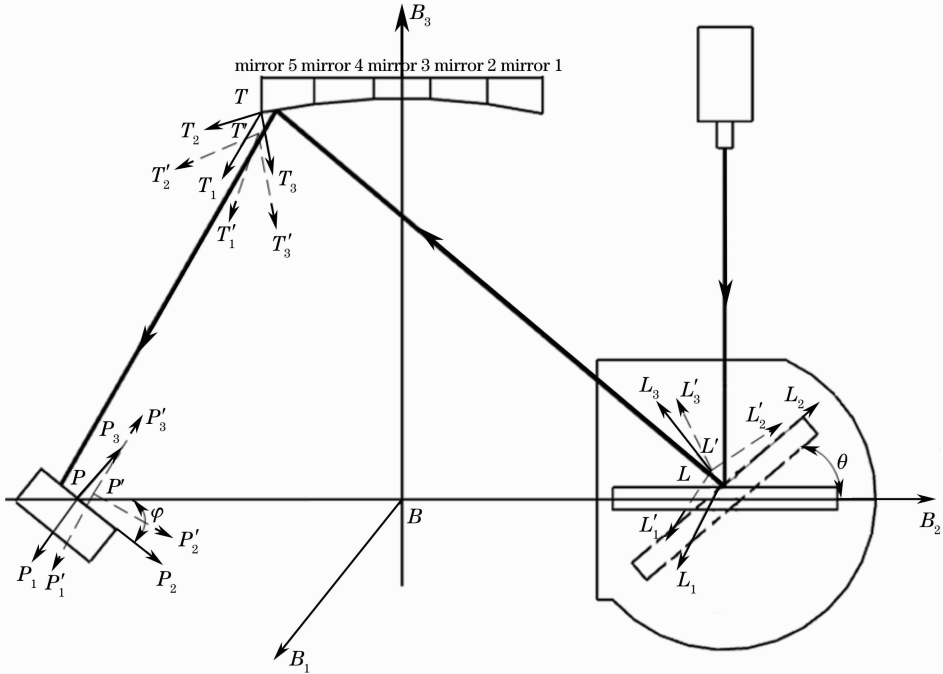


图 3 坐标系定义

Fig. 3 Definition of the coordinate system

1) 固定在基座的定坐标系 $B-B_1B_2B_3$ 。 B_2BB_3 面平行于基座平面, B 是图 1 中椭圆中心, B_1 轴垂直于基座平面向上, B_2 轴沿椭圆长轴方向指向被检测指向反射镜, B_3 轴沿椭圆短轴方向指向阵列平面反射镜。

2) 随被检指向反射镜的动坐标系 $L-L_1L_2L_3$ 。原点 L 是光束在指向反射镜上反射点, 在基座坐标系的坐标为 $(0, c, d)$, d 为指向反射镜厚度和转角的函数; L_1, L_2 轴在指向反射镜的反射面上, L_1 轴与 B_1 轴同向, L_3 轴沿镜面法线方向。

3) 固定于阵列平面反射镜中各镜的坐标系 T_i , 由于各镜的分析方法相同, 以反射镜 5 为例。原点 T 在反射镜 5 的左端点, 在基座坐标系的坐标为 $(0, y_0, z_0)$, T_1 和 T_2 轴在平面反射镜的反射面上, T_1 轴与 B_1 轴方向相同, T_3 轴沿平面反射镜法线方向。

4) 固定在 CCD 光敏面的坐标系 P 。原点 P 为线阵 CCD 的中心, 在基座坐标系的坐标为 $(0, -c, 0)$, P_1 轴与 B_1 轴平行, P_3 轴沿线阵 CCD 光敏面法向, P_2 轴为线阵 CCD 各个像元中点连线, 与 B_2 轴夹角为 φ 。

L, T, P 三个坐标系由于存在装调误差的失调坐标系为 L', T', P' 。

3.2 系统误差源分析

系统的误差源包括加工及装调误差、激光光斑重心漂移误差 ($1/10$ 像元尺寸, $0.25''$) 和 CCD 细分误差 ($0.5''$), 均为随机误差。本文主要分析加工、装调误差, 具体包括: 被检指向反射镜装调误差、阵列平面反射镜加工和装调误差以及线阵 CCD 装调误差, 如表 1 所示, 3σ 值为目前加工、装调比较容易实现的水平。

表 1 误差项定义和数值
Table 1 Definitions, distribution types and values of errors

No.	Error variable name	Distribution	3σ
1	Pointing mirror alignment error (move Δd_1 along axis L_3)	Gauss	$\pm 20 \mu\text{m}$
2	Pointing mirror alignment error (rotate $\Delta\alpha_1$ around axis L_2)	Gauss	$\pm 30''$
3	Array mirror processing error (rotate $\Delta\beta_1$ around axis T_1)	Gauss	$\pm 30''$
4	Array mirror processing error (rotate $\Delta\beta_2$ around axis T_2)	Gauss	$\pm 30''$
5	Array mirror alignment error (move Δh_1 along axis T_3)	Gauss	$\pm 20 \mu\text{m}$
6	Array mirror alignment error (rotate $\Delta\delta_1$ around axis T_1)	Gauss	$\pm 30''$
7	Array mirror alignment error (rotate $\Delta\delta_2$ around axis T_2)	Gauss	$\pm 30''$
8	Linear CCD alignment error (move ΔS_1 along axis P_1)	Gauss	$\pm 20 \mu\text{m}$
9	Linear CCD alignment error (move ΔS_2 along axis P_2)	Gauss	$\pm 20 \mu\text{m}$
10	Linear CCD alignment error (move ΔS_3 along axis P_3)	Gauss	$\pm 20 \mu\text{m}$
11	Linear CCD alignment error (rotate $\Delta\gamma_1$ around axis P_1)	Gauss	$\pm 30''$
12	Linear CCD alignment error (rotate $\Delta\gamma_2$ around axis P_2)	Gauss	$\pm 30''$
13	Linear CCD alignment error (rotate $\Delta\gamma_3$ around axis P_3)	Gauss	$\pm 30''$

为满足检测精度要求,对表 1 中 13 个误差变量进行分配,以各误差量的数值和数学模型为基础,通过曲线拟合,分析各加工、装调误差对精度的影响,确定具体加工和装调方案。

3.3 系统数学模型

坐标系 B 中,取入射光线 A_0 上两点坐标为 I_1 ,

I_2 ,将 I_1 、 I_2 转换至坐标系 L 的平移和旋转矩阵分别为 M_1 、 M_2 ,坐标系 L 的原点在坐标系 B 中的坐标为 $(0, d_1, d_2)$,坐标系 L 变换至包含位置误差量 Δd_1 和角度误差量 $\Delta\alpha_1$ 的坐标系 L' 的平移和旋转矩阵分别为 M_3 、 M_4 ,则坐标系 B 到坐标系 L' 的变换矩阵为

$$M_4 M_3 M_2 M_1 = \begin{bmatrix} \cos \Delta\alpha_1 & 0 & -\sin \Delta\alpha_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \Delta\alpha_1 & 0 & \cos \Delta\alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

I_1 、 I_2 在坐标系 L' 坐标为 $I_{1L'}$ 、 $I_{2L'}$,则

$$I_{1L'} = M_4 M_3 M_2 M_1 I_1, \quad I_{2L'} = M_4 M_3 M_2 M_1 I_2. \quad (3)$$

$I'_{1L'}$ 、 $I'_{2L'}$ 为 $I_{1L'}$ 、 $I_{2L'}$ 关于反射镜面的镜像点即指向反射镜反射光线 A_1 上两点,则

$$I'_{1L'} = E' I_{1L'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} I_{1L'}, \quad I'_{2L'} = E' I_{2L'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} I_{2L'}. \quad (4)$$

根据光束传播过程,将 $I'_{1L'}$ 、 $I'_{2L'}$ 变换至坐标系 T' ,同样可求出坐标系 T' 反射光线上两点 $I'_{1T'}$ 、 $I'_{2T'}$,最后将 $I'_{1T'}$ 、 $I'_{2T'}$ 变换至坐标系 P' ,其坐标为 $I_{1P'}$ 、 $I_{2P'}$,由 $I_{1P'}$ 、 $I_{2P'}$ 可计算光束在 CCD 上的光斑位置^[8-11]。

4 误差分配分析及验证

4.1 理论值计算

反射镜 5 对应的测角范围为 $18.6^\circ \sim 20.8^\circ$,利

用 3.3 节的数学模型,在 $18.6^\circ \sim 20.8^\circ$ 内均匀选取角度点 $\theta_i (i=1 \sim 2200)$,各误差为零时,CCD 上光斑中心的理论位置为 y_{0i} ,通过曲线拟合得到 $\theta_i - y_{0i}$ 的关系曲线 y_0 为

$$y_0 = -0.00198\theta^2 - 25.08\theta + 497.3. \quad (5)$$

4.2 误差分析

系统光源为一字线激光器,光斑在 P_1 轴为一长条形,所以 P_1 轴方向误差可忽略不计,只分析 P_2 轴方向的误差。

对于表 1 的 13 个误差量,给定各误差的极限误

差 $3\sigma_j (j=1\sim 13)$, 利用蒙特卡罗法, 按高斯分布选取 1000 组随机数, 即确定 1000 组误差状态。每组误差状态下, 计算每个角度测量点 θ_i 对应的光斑中心位置 y , 通过曲线拟合得到角度位置和光斑中心位置的 θ - y 曲线, 1000 组误差状态拟合出 1000 条关系曲线。首先采用绝对位置测量误差方法分析调整极限误差 $3\sigma_j$, 使 1000 组误差状态下与理论曲线 y_0 误差最大的两条曲线 y_1, y_2 在各个测量点 θ_i 与理论值 $y_0(\theta_i)$ 误差小于 1 pixel ($9 \mu\text{m}$), 各加工、装调极

表 2 绝对位置测量误差满足要求的误差分配

Table 2 Error budgets based on absolute measurement error

Variable	Δd_1	$\Delta \alpha_1$	Δh_1	$\Delta \beta_1$	$\Delta \beta_2$	$\Delta \delta_1$	$\Delta \delta_2$
3σ	0.02 mm	10"	0.01 mm	5"	5"	10"	20"
Variable	ΔS_1	ΔS_2	ΔS_3	$\Delta \gamma_1$	$\Delta \gamma_2$	$\Delta \gamma_3$	
3σ	0.02 mm	0.02 mm	0.02 mm	20"	30"	30"	

由于角度测量的绝对位置测量误差受各误差量影响较大, 以绝对位置测量误差为评价量进行误差分配时, 加工、装调的代价较高。当系统的加工、装调状态确定后, 测量时各个角度测量点均存在绝对位置测量误差, 此时任意两个测量点相对位置变化量的误差受加工、装调误差的影响不大。由于本系统是检测指向反射镜的转速, 不进行指向反射镜绝对角位置的检测, 所以可以依据相对位置测量误差进行误差分配, 调整 13 个误差量如表 3 得到两条极限误差状态下的拟合曲线

表 3 相对误差量满足要求的误差分配

Table 3 Error budgets based on relative measurement error

Variable	Δd_1	$\Delta \alpha_1$	Δh_1	$\Delta \beta_1$	$\Delta \beta_2$	$\Delta \delta_1$	$\Delta \delta_2$
3σ	0.2 mm	20"	0.05 mm	20"	20"	20"	20"
Variable	ΔS_1	ΔS_2	ΔS_3	$\Delta \gamma_1$	$\Delta \gamma_2$	$\Delta \gamma_3$	
3σ	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm	30"	30"	30"	

由表 2、3 可见, 依据相对位置测量误差确定系统的误差分配方案比依据绝对位置测量误差大大降低了加工、装调的精度要求。设计时, 可在 CCD 两端留一定余量, 用于补偿系统由各加工、装调误差引起的像面光斑绝对位置误差。

按随机误差合成公式, 综合装调、加工误差 Δ_1 (光斑中心 $5 \mu\text{m}$ 误差量对应测角误差为 $1.39''$), CCD 细分误差 Δ_2 , 激光光斑重心漂移误差 Δ_3 , 由于以上三种原因造成的系统不确定度为

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2} = \sqrt{1.39^2 + 0.5^2 + 0.25^2} = 1.6'', \quad (15)$$

满足系统分辨率 $0.5''$, 不确定度小于 $2''$ 的要求。

限误差为表 2 中数据时得到两条曲线为

$$y_1 = -0.001968\theta^2 - 25.08\theta + 497.3, \quad (6)$$

$$y_2 = -0.001992\theta^2 - 25.08\theta + 497.3, \quad (7)$$

绝对位置测量误差

$$\Delta y_1 = y_1 - y_0 = 0.000012\theta^2, \quad (8)$$

$$\Delta y_2 = y_2 - y_0 = -0.000012\theta^2. \quad (9)$$

当 $\theta=20.8^\circ$ 时, 最大绝对位置测量误差 0.005 mm 。

$$y_3 = -0.001892\theta^2 - 25.08\theta + 497.4, \quad (10)$$

$$y_4 = -0.00204\theta^2 - 25.08\theta + 497.2. \quad (11)$$

此时绝对位置测量误差为

$$\Delta y_3 = y_3 - y_0 = 0.00006\theta^2 + 0.1, \quad (12)$$

$$\Delta y_4 = y_4 - y_0 = -0.00006\theta^2 - 0.1. \quad (13)$$

当处于 y_3 误差状态时, θ 为 $18.6^\circ \sim 20.8^\circ$, 边界两个角度测量点的相对位置测量误差最大:

$$\Delta y_r = \Delta y_3(20.8) - \Delta y_3(18.6) \approx 0.005 \text{ mm}. \quad (14)$$

5 结 论

通过齐次坐标变换法, 建立了含有加工、装调误差的数学模型, 利用曲线拟合出理论 θ - y 曲线和含有误差量的 θ - y 曲线, 对比绝对位置测量误差和相对位置测量误差拟合结果, 结果显示依据相对位置测量误差的方案效果更好。最终的误差分配方案降低了加工、装调的要求, 保证系统在 11° 测角范围内分辨率为 $0.5''$, 不确定度小于 $2''$ 。本误差分析方法的结果为样机研制提供了详细的数据, 并且验证了系统的原理可行性。

参 考 文 献

1 Wang Yiqun, Liu Wei, Yan Changxiang. Development of high-

- precision scanning mirror assembly of imaging spectrometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(11): 2703–2706.
汪逸群, 刘 伟, 颜昌翔. 成像光谱仪运动补偿扫描镜的研制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2703–2706.
- 2 Wang Yiqun, Yan Changxiang, Jia Ping. Motion precision measurement of imaging spectrometer's scanning mirror [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(2): 185–188.
汪逸群, 颜昌翔, 贾 平. 成像光谱仪扫描镜运动准确度测量[J]. 光子学报, 2012, 41(2): 185–188.
- 3 Ramuhalli Krishna. Improved pointing accuracy using high precision theodolite measurements [C]. SPIE, 1996, 2812: 199–209.
- 4 Wang Yiqun, Yan Changxiang, Jia Ping. Non-contact position precision detecting method of scanning mirror [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 1057–1060.
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.
- 5 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): 875–880.
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.
- 6 Wei Xinwu, Meng Weihua, Liu Wenwu. High precision angle measurement of high-frequency scanning mirror [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(s1): 35–38.
魏新武, 孟卫华, 刘文武. 高频摆镜摆角的高精度测量[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(s1): 35–38.
- 7 Gao Min, Bian Zhenglan, Dong Zuoren *et al.*. Research on performance test of scanning mirror based on dynamic autocollimation [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0208001.
高 敏, 卞正兰, 董作人等. 扫描镜动态性能的自准直检测技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0208001.
- 8 Wang Jiaqi, Jin Guang, Yan Changxiang. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(2): 105–116.
王家骐, 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.
- 9 Hu Chunhui, Yan Changxiang. Optical-mechanical assembly based on Gaussian optical homogeneous coordinate transformation [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2353–2359.
胡春晖, 颜昌翔. 基于高斯光学齐次坐标变换的光机装调[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2353–2359.
- 10 Mao Yingtai. Theory of Error and Precision Analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982.
毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- 11 Hu Chunhui, Yan Changxiang, Shao Jianbing. Pointing mirror low frequency sine oscillation induced remote sensor image distortion and correction [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 33(4): 0428002.
胡春晖, 颜昌翔, 邵建兵. 指向镜低频正弦振动下遥感器图像的畸变及校正[J]. 光学学报, 2012, 33(4): 0428002.

栏目编辑: 何卓铭