GSSMP 转动精度的测量与标定

安其昌[1,2],张景旭[1],杨 飞[1],赵宏超[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:为了更好地实现巨型可控科学反射镜原理演示验证平台(Giant Steerable Science Mirror Prototype,GSSMP)的指向功能,需要对 GSSMP 的转动精度进行测量与标定,利用激光跟踪仪对转台编码器进行标校,并通过激光跟踪仪完成角度测量。首先,基于角度测量原理进行了接触式测量和非接触式测量方式的单点精度标校,得到测量误差分别为 23.7″与 0.71″。通过公式推导验证,四个角反射器的使用能够消除 6 以及 6 的倍数谐波之外所有阶数的谐波,从而提高测量精度。最后,比较四个角反射器两种不同的排布方式的角度测量误差,得出均匀分布的误差为 11.5″,非均匀分布误差为 9.04″,而单个角反射器测量误差为 23.7″。通过激光跟踪仪对望远镜方位轴转动精度的测量,验证了所述理论的正确性与方法的可行性。研究结果对于 30 m 望远镜的工作进一步完成有着重要的意义,同时对于类似的转台精度的检测也有一定的指导意义。

关键词:误差分析; 角度测量; 转动精度标定; 激光跟踪仪
中图分类号:TH751 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.0917004

Metrology and calibration of GSSMP rotation accuracy

An Qichang[1,2], Zhang Jingxu[1], Yang Fei[1], Zhao Hongchao[1]

(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)

Abstract: In order to better realize the pointing function of GSSMP, the rotation accuracy of GSSMP needs to be measured and calibrated, the rotation encoder was calibrated with the laser tracker, and the angle measurement was completed with the laser tracker. First of all, based on the principle of angle measurement, the contact measurement and non-contact measurement methods of single point calibration precision and error of measurement were 23.7″ and 0.71″. It was proved by formula derivation that four Sphere Mounted retro-Reflectors (SMRs) can eliminate the harmonics of all orders other than the multiple harmonics of 6 improving the measurement accuracy. Finally, the angular measurement error of two

收稿日期:2018-04-06; **修订日期**:2018-05-11
基金项目:国家自然科学基金(11673080);国家重点研发计划(2017YFE0102900);
吉林省科技发展计划优秀人才基金(20180520171JH);中国科学院青年创新促进会(2016198)
作者简介:安其昌(1988-),男,助理研究员,博士生,主要从事大口径光机系统检测装调方面的研究。Email:anjj@mail.ustc.edu.cn
导师简介:张景旭(1964-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事大型光电望远镜结构总体技术方面的研究。
Email:zhangjx@ciomp.ac.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

different arrangement methods of four SMRs was compared, and the uniform distribution error was 11.5″, the non-uniform distribution error was 9.04″, and the measurement error of a single angular reflector was 23.7″. By measuring the rotation precision of the telescope′s azimuth axis with laser tracker, the correctness of the theory and the feasibility of the method were verified. The research were of great significance to the further completion of the work of the 30 m telescope.

Key words: error analysis; angular metrology; rotation calibration; laser tracker

0 引 言

30 m 望远镜是国际合作的大口径望远镜,其中中国科学院长春光学精密机械与物理研究所承担了三镜的建设任务。由于三镜在望远镜工作时需要通过自身的两维偏摆,将主镜所收集的光线折转到位于望远镜两侧的科学终端处,故 30 m 望远镜三镜又被称为巨型科学可控反射镜 (Giant Steerable Science Mirror,GSSM)。由于 GSSM 的巨大尺寸及其所带来的巨大难度,中国科学院长春光学精密机械与物理研究与 30 m 望远镜项目组经过协商,在全尺寸系统建设之前,首先建造一个缩比 1/4 的巨型可控科学反射镜原理演示验证平台(Giant Steerable Science Mirror Prototype,GSSMP)作为主要指标与技术要求的验证平台,为全尺寸 GSSM 的建设打下基础。

为了更好地实现 GSSM 光线的折转作用,30 m 望远镜对 GSSM 的运动能力(Motion)提出了诸多要求。由于 30 m 望远镜的特殊要求,GSSM 所有的精度指标都基于平面镜本身的刚体位移,并折算到对光线的折转功能的影响。在此情况下,一般的测量设备(如自准直仪)无法使用。故选取三维坐标测量仪器——激光跟踪仪作为测量仪器。由于激光跟踪仪无法对连续的转动进行测量,故首先需要使用激光跟踪仪对编码器进行标校,保证编码器的精度之后,通过编码器实施后续检测步骤[1-3]。

利用激光跟踪仪进行角度测量,在大麦哲伦望远镜(Giant Magellan Telescope,GMT)的装调检测中已经开始有广泛的应用。GMT 主镜是由七块硼硅酸盐所铸造的子镜构成,每一块子镜直径为 8.4 m,其集光面积相当于直径为 21.9 m 的整镜,同时在近红外波段工作时,其衍射极限相当于口径为 24.5 m 的望远镜。GMT 主镜需要使用计算全息图(Computer Generated Holograph,CGH)进行检测。安装 CGH 时,其角度是一个非常重要的指标。利用激光跟踪仪可以通过平面镜的反射追踪角反射器(Sphere Mounted retro-Reflector,SMR)的特点,基于解空间三角形原理即可得到镜面的法线在空间中的方向[3-5],这样的方法不需要形成准直光路,对检测的条件要求较为宽松。詹姆斯韦伯空间望远镜 (James Webb Space Telescope,JWST) 是一台口径为 6.5 m 的空间望远镜,由 18 块子镜组成。在对 JWST 主镜单元进行安装与调试的过程中使用了激光跟踪仪与六自由度机器人。同时利用多个激光跟踪仪交互测量,不仅提高了精度,也避免了由于光线遮挡而对某些极限位置无法进行有效的检测[4-8]。

Ralf 指出[9]:在角度测量中使用多个角度测量元件可以提高角度测量的精度,同时合理的排布可以更好地减少测量误差。对数量一定的角度传感器来说,合理的布局与数据处理方法可进一步提高精度[10-11]。

文中利用激光跟踪仪对 GSSMP 转台编码器进行标校,并完成角度测量。通过理论分析及实验验证,对不同测量方法带来的误差进行了比较。

1 GSSM/GSSMP 系统要求

根据 30 m 望远镜系统的要求,三镜方位轴需要在两个扇区中运动,分别为 14°与-28°之间以及 166°与 208°之间。在此范围内要求其指向精度为 3.5″。在此区域之外是快速转动(Slewing)区域,要求在尽量短的时间内,实现对同一科学终端不同观测目标之间的切换以及不同科学终端之间的转换,具体的数值要求如表 1 所示。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 GSSM 快速转动要求

Tab.1 GSSM slewing requirement

Slewing condition	Largest slew angle /(°)		Maximum slew and settle time/s	
	Rotation	Tilt	Rotation	Tilt
Targets without changing instruments	16	13	60	60
Instrument without changing platform	42	16	150	60
Instrument on different platform	236	16	270	60

系统指向其工作范围内任意位置时，其进行小角度运动时，其方位与俯仰误差都要小于要求值。如表 2 所示。

表 2 小角度运动要求

Tab.2 Small angle motion requirement

Small angle for rotation /(″)	Small angle error for rotation/(″)	Small angle for tilt/(″)	Small angle error for tilt /(″)
0.5	0.38	0.2	0.35
27.5	0.38	14.1	0.35
165.1	0.75	84.6	0.70

对 GSSMP 而言，其方位轴运动范围与 GSSM 相同。同时，GSSMP 小角度运动误差要求也与 GSSM 相同。

下面描述建立坐标系的过程。利用方位轴的转动来定义 $X-Y$ 平面原点以及 ECRSZ−Axis。由于转台上预留的基准与 ECRSX−Axis 平行，故利用该边缘建立 ECRSX−Axis。

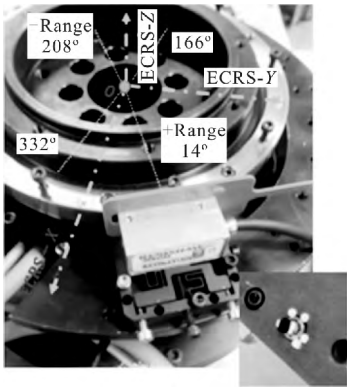

图 1 GSSMP 方位轴以及坐标系

Fig.1 GSSMP rotation axis and its coordinate system

对 GSSMP 而言，SMR 安装于主镜之上，为了模拟其实际的复杂工况，利用倾斜台将 GSSMP 倾斜至某个角度进行标校实验。同时，在每个角度进行测试之前，都需要将 GSSMP 向相反的方向分别倾斜 ζ_1 及 ζ_2，保证系统中的间隙可以充分体现，以期更好地模拟 GSSM 的实际工况。其中，T_1~T_4 为测试靶球位置，B_1~B_3 为基准靶球位置。靶球连接的形式如图 2 所示。

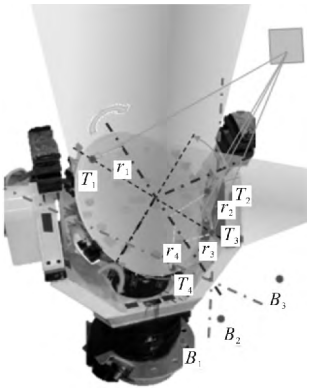

图 2 GSSM 方位轴运动范围

Fig.2 Motion range of the GSSM rotation axis

2 激光跟踪仪角度测量基本原理

利用激光跟踪仪进行角度测量主要分为两种形式：接触式测量与非接触式测量，其最大的区别在于 SMR 是否固定在转台之上。

利用正切可以在建立的坐标系中利用靶标坐标 (x_i, y_i) 反推靶标所转过的角度。激光跟踪仪所测得的角度表达式如公式(1)所示。

由 $\tan(\theta_i)=\frac{y_i}{x_i}$ 可得：

$$\theta_i=\begin{cases}\dfrac{\pi}{2}, x_i=0\\ \arctan\left(\dfrac{y_i}{x_i}\right), x_i\neq 0\end{cases} \tag{1}$$

设其角度测量误差为 $\Delta\theta$，$\Delta\theta$ 可表示为傅里叶级数展开的形式，如公式 2 所示：

$$\Delta\theta=\sum_{k=1}^{m}\frac{e_k}{R}\sin(k\theta)_{(k=1\cdots m)} \tag{2}$$

式中：k 为谐波的阶数，代表误差的空间频率的高低；e_k 表示 k 阶谐波所对应的误差；R 表示转动半径；θ 为转动过的角度。

假设系统有 N 个位于相同半径 R 的数据采集

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

传感器,将其平均可得:

$$\Delta\theta_{\Sigma}=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{m}\frac{e_k}{R}\{\sin(k\theta)+\sin\left(k\theta+k\frac{2\pi}{N}\right)+\cdots\cdots+\sin\left[k\theta+k(N-1)\frac{2\pi}{N}\right]\}$$

对上式进行变形可得其简化表达式如下:

$$\Delta\theta_{\Sigma}=\frac{1}{N}\frac{e_k}{R}\left[\frac{\cos\left[k(N-1)\frac{\pi}{N}\right]\sin\left(Nk\frac{\pi}{N}\right)}{\sin\left(k\frac{\pi}{N}\right)}\right] \tag{3}$$

假设角度测量是由两组传感器共同完成,根据公式(3)可得其表达式如公式(4)、(5)所示:

$$\Delta\theta_{1\Sigma}=\frac{1}{N_1}\frac{e_k}{R}\left[\frac{\cos\left[k(N_1-1)\frac{\pi}{N_1}\right]\sin(k\pi)}{\sin\left(k\frac{\pi}{N_1}\right)}\right] \tag{4}$$

$$\Delta\theta_{2\Sigma}=\frac{1}{N_2}\frac{e_k}{R}\left[\frac{\cos\left[k(N_2-1)\frac{\pi}{N_2}\right]\sin(k\pi)}{\sin\left(k\frac{\pi}{N_2}\right)}\right] \tag{5}$$

$$\Delta\theta_{\Sigma}=\frac{\Delta\theta_{1\Sigma}+\Delta\theta_{2\Sigma}}{2}=\frac{\sin(k\pi)e_k}{2R}\times\frac{\cos\left[k(N_1-1)\frac{\pi}{N_1}\right]\sin\left(k\frac{\pi}{N_2}\right)N_2+\cos\left[k(N_2-1)\frac{\pi}{N_2}\right]\sin\left(k\frac{\pi}{N_1}\right)N_1}{N_1N_2\sin\left(k\frac{\pi}{N_1}\right)\sin\left(k\frac{\pi}{N_2}\right)} \tag{6}$$

当 $k=c_1N_1$ 且 $k=c_2N_2$ 时,$|\Delta\theta_{\Sigma}|=\frac{e_k}{R}$;当 $k\neq c_1N_1$ 或 $k\neq c_2N_2$ 时,$|\Delta\theta_{\Sigma}|=0$。

故可以得到,使用四个激光跟踪仪靶球进行计算,如公式(7)所示,仅剩余六阶误差与 6 的整数倍阶的误差。

$$\Delta_i=\frac{1}{2}\left(\frac{\theta_{1i}+\theta_{3i}}{2}+\frac{\theta_{2i}+\theta_{3i}+\theta_{4i}}{2}\right),i=1,2,3,\cdots \tag{7}$$

非接触式测量的原理如图 3 所示。利用镜面的转动实现对角位移的放大。

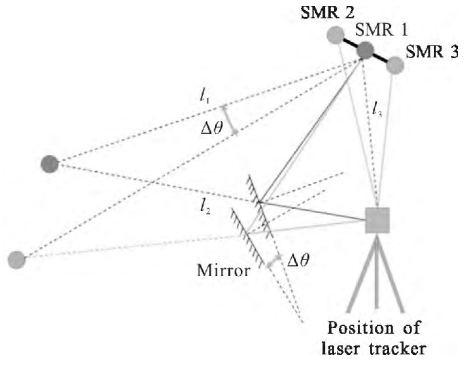

图 3 利用平面镜进行角度测量的原理图

Fig.3 Schematic diagram of the angle measurement by flat mirror

首先直接测量 SMR 的坐标,之后通过反射得到 SMR 在镜中像的坐标。计算镜面的倾斜角度。在粗调之后调整 SMR 的位置,使之尽可能利用反射镜中间位置反射。计算反射镜对准之后的坐标值。由于 SMR 可以接收一定视场范围的光线,微调镜面,直至镜中的坐标达到要求值。

利用激光跟踪仪进行装调的核心思想是将装调所谓指标(表征量)折合为点坐标值,因为对激光跟踪仪而言,点坐标值是实时反馈的。

图 3 中使用光杠杆将转动所引起的位移放大,在转角一定的条件下,相当于扩大了转动半径。同时,由于靶球实际的位置比较接近激光跟踪仪,故其测量系统误差也较小。

3 角度测量精度分析与验证

为了得到激光跟踪仪的随机误差,需要将激光跟踪仪指向固定的位置,并进行一段时间的采样。一般来说,测量误差都具有一定的时域周期,故每次检测的时间应控制在该周期之内。系统误差的特征时间长度与实验周期相比,可以认为是无限长的,而随机误差的特征时间长度应该接近于零,因为任意的两个测量值之间都没有相关性。

介于系统误差与随机误差之间的还有漂移误差,其特征时间长度介于两者之间。漂移误差可以利用线性模型或者二次型模型进行表征。当两条序列之间存在漂移误差时,其互相关系数就会偏离零。不同采样序列的互相关系数表达式如下:

$$C(n)=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-E_{x_i})(y_i-E_{y_i})}{D_{x_i}D_{y_i}} \tag{8}$$

式中:x_i,y_i 为采样序列;E_{x_i} 与 E_{y_i} 为采样长度 n 时,序列对应的均值;D_{x_i} 与 D_{y_i} 为采样长度 n 时,序列对应的标准差。

激光跟踪仪随机误差序列互相关系数如图 4 所示。各次测量之间的独立性都比较好,故检测到的误差序列可以认为仅存在随机误差,其 RMS 为 5 μm。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

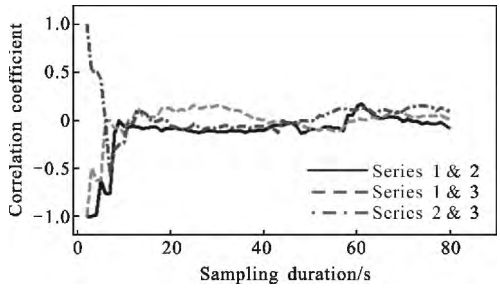

图 4 激光跟踪仪随机误差序列互相关系数

Fig.4 Series of laser tracker random error correlation coefficient

激光跟踪仪单点角度测量精度标校如图 5 所示。同时进行了接触式与非接触式两种测量方式的单点精度标校。对单点直接测量而言，需保证激光束可以到达 SMR 并返回。对利用平面镜进行测量的情况而言，可以不形成准直光路，对测量的空间以及范围要求都有所放宽。

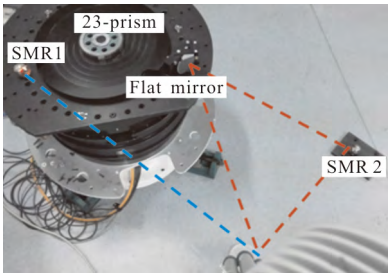

图 5 激光跟踪仪单点角度测量精度标校

Fig.5 Single point angle measurement error for laser tracker

同时需要注意，激光跟踪仪在小范围内测量与大范围内测量的误差分布是不同的。因为在小范围内，激光跟踪仪内部编码器的积累误差影响比较小。激光跟踪仪单点角度测量精度如图 6 所示，激光跟踪仪小角度测量精度如图 7 所示。经过分析可得 GSSMP 方位轴标定误差估计如表 3 所示，在其中对单点测量时的诸多误差进行了估计，同时与实际检测值进行比较。

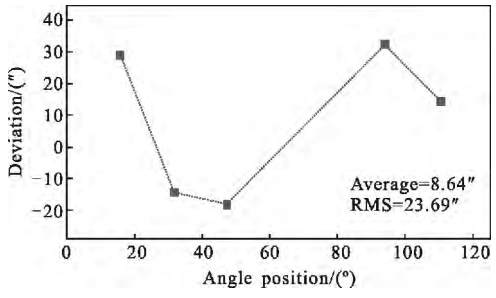

图 6 激光跟踪仪单点角度测量精度

Fig.6 Accuracy of laser tracker single point angle metrology

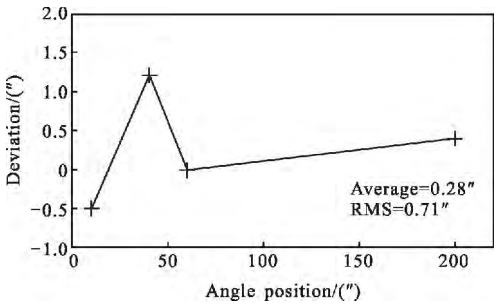

图 7 激光跟踪仪小角度测量精度

Fig.7 Accuracy of laser tracker small angle metrology

表 3 GSSMP 方位轴标定误差估计

Tab.3 GSSMP rotation calibration error estimation

Error source	Estimated	Measured
Laser tracker random error	–	5 μm
Interface repeatable error	5 μm	–
Laser tracker system error	10 μm	–
Interface location error	20 μm	–
Total	23.0 μm	
In arc second	23.0 μm/0.2 m=23.0″	
Measured	23.7″	

对小角度测量而言，测量误差为 0.71″，主要原因在于转动半径偏小，实际系统转动半径将加大四倍，从而角度测量误差也会减小到大约四分之一[12-13]。

4 GSSMP 旋转轴精度标定

实际检测时，SMR 的安放如图 8 所示，选取对称轴的两侧以及等边三角形的三个顶点，由于两组 SMR 之间有一个是共用的，故一共需要使用四个 SMR。根据之前的推导可得，该构型可以消除 6 以及 6 的倍数谐波之外所有阶数的谐波。一般来说，高于十阶的谐波很难找到其对应的物理意义。如果仅考虑十阶以内的误差，使用该构型进行测量，仅剩余六阶谐波。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

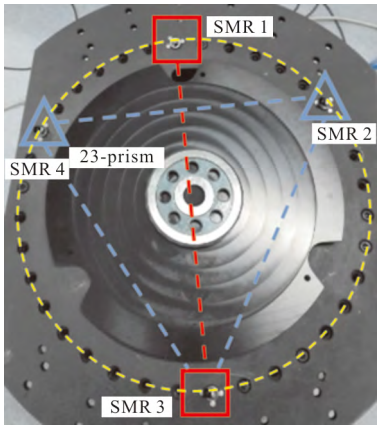

图 8 GSSMP 方位轴精度实验设备

Fig.8 Testing equipment of GSSMP rotation axis accuracy

实验第一步：建立如图 2 所示的坐标系；第二步：转动转台，分别将 2、3 面体与自准直仪对准，形成自准直光路，分别记录四个 SMR 的坐标值，利用公式(7)计算转过的实际角度；第三步：利用编码器驱动转台，如图 2 所示的区域内以一度为步长转动，记录四个 SMR 的坐标值并计算其转动的角度。GSSMP 方位轴精度实验数据即四个 SMR 的角度测量值如图 9 所示。

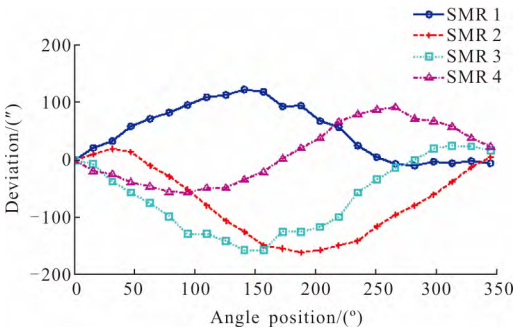

图 9 GSSMP 方位轴精度实验数据

Fig.9 Experimental data of the GSSMP rotation axis accuracy

为了验证方法的正确性，对比了图 8 所示的构型与四个 SMR 均匀分布情况下的误差曲线，可得均匀分布均方根为 11.5″，非均匀布局为 9.04″。使用不同数量靶球所得的方位轴误差曲线如图 10 所示，可见由于排布不同，检测精度也不尽相同。

经过精度实验后就可以进行误差表的建立工作。GSSMP 方位轴精度误差表如图 11 所示。具体来说，以图 2 中正半区的 X 轴为参考位置，以 1°为步长，覆盖 20°的区域。利用四个 SMR 的数据得到的转台转角与驱动系统的命令相比就可以得到误差表。

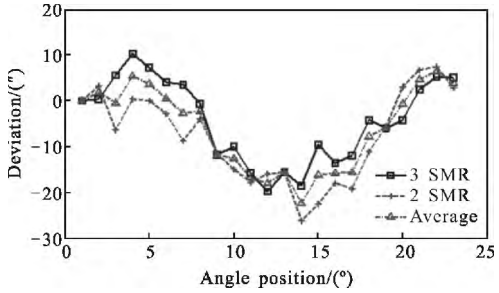

图 10 使用不同数量靶球所得的方位轴误差曲线

Fig.10 Error curve of rotation axis by different mount of SMR

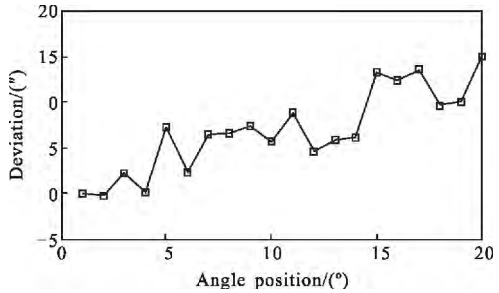

图 11 GSSMP 方位轴精度误差表

Fig.11 Look up table of the GSSMP rotation axis accuracy

5 结 论

以 GSSMP 方位轴为例进行了基于激光跟踪仪的编码器误差标定以及小转角转动实验，得出使用单个 SMR 进行转动测量的精度为 23.7″，使用四个 SMR 的精度为 9.04″，并与不同形式的 SMR 排布进行比较，得出均匀分布的四个 SMR 的精度为 11.5″。同时利用激光跟踪仪进行小角度运动检测的精度为 0.71″。测量误差的主要成分是六阶谐波以及随机噪声。由于排布不同，检测精度也不尽相同，对于同样数量的 SMR 而言，选择合理的组合使剩余的谐波次数尽量的高，可以有效提高其精度水平。对 GSSMP 标定而言，小角度测量精度略显不足，但是对实际的 4 m 级 GSSM，其精度将上升 4 倍，即可满足技术要求。

参考文献：

[1] Deng Yongting, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Large telescope low speed control based on adaptive sliding mode control[J]. ***Chinese Optics***, 2016, 9(6): 713-720. (in Chinese)
邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于自适应滑模控制的大型

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

望远镜低速控制[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 713-720.

[2] West S C, Burge J H, Cuerden B, et al. Alignmentand use of the optical test for the 8.4 m off-axis primary mirrors of the Giant Magellan Telescope [C]// Modern Technologies in Space and Ground Based Telescopes and Instrumentation, SPIE, 2010, 7739: 773921.

[3] Deng Yongting, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Main axes AC servo control system for 2 m telescope [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2017, 25(1): 163-171. (in Chinese)
邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 2 m 望远镜主轴交流伺服控制系统设计[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(1): 163-171.

[4] Sabelhaus P A, Campbell D, Clampin M, et al. An overview of the James Webb Space Telescope (JWST) project [C]// SPIE, 2005, 5899: 241-254.

[5] Zobrist T, Burge J H, Davison W B, et al. Measurements of large optical surfaces with a laser tracker [C]// Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation, SPIE, 2008, 7018: 70183U.

[6] Dong Jing, Wan Qiuhua, Yu Hai, et al. Automatic detection system of fault code for small size absolute photoelectric encoder[J]. ***Chinese Optics***, 2016, 9(6): 695-703. (in Chinese)
董静, 万秋华, 于海, 等. 小型绝对式光电编码器误码自动检测系统[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 695-703.

[7] Tsukasa W, Masahito K, Nobuo N, et al. An angle encoder for super-high resolution and super-high accuracy using SelfA[J]. ***Meas Sci Tchnol***, 2014, 25: 065002.

[8] Zhang Hongbo, Wan Qiuhua, Wang Shujie, et al. Installation error control of dynamic measurement for small photoelectric encoder [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2016, 24(7): 1655-1660. (in Chinese)
张洪波, 万秋华, 王树洁, 等. 小型编码器动态精度检测的安装误差控制[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(7): 1655-1660.

[9] Ralf D, Alfred L, Michael K, et al. Capabilities and limitations of the self calibrationof angle encoders [J]. ***Meas Sci Technol***, 2014, 25: 055003.

[10] Yandayan T, Ozgur B, Karaboce N, et al. High precision small angle generator for realization of SI unit of plane angle and calibration of high precision autocollimators [J]. ***Meas Sci Technol***, 2012, 23: 094006.

[11] Zhang Zili, Zhu Han, Zhou Weihu. Error calibration and correction of mirror tilt in laser trackers [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2015, 23 (5): 1205 -1212. (in Chinese)
张滋黎, 朱涵, 周维虎. 激光跟踪仪转镜倾斜误差的标定及修正[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(5): 1205-1212.

[12] Xia Peipei, Deng Yongting, Wang Zhiqian, et al. Model identification for K mirror turntable of 2 m telescope [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(3): 0318001. (in Chinese)
夏培培, 邓永停, 王志乾, 等. 2 m 望远镜消旋 K 镜转台的模型辨识[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0318001.

[13] An Qichang, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Error analysis of the giant steering science mirror jitter testing [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(2): 0217002. (in Chinese)
安其昌, 张景旭, 杨飞, 等. GSSM 系统抖动测量误差分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0217002.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net