**CN** 53 – 1189/**P ISSN** 1672 – 7673

# 地平式望远镜轴系误差对指向 精度和跟踪精度的影响<sup>。</sup>

## 马 $锦^{123}$ ,顾伯忠<sup>12</sup>

(1.中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,江苏 南京 210042;

2. 中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:采用球面几何的方法推导轴系位置误差对地平式望远镜指向、跟踪精度影响的计 算模型。介绍2米级地平式望远镜轴系误差检测及数据处理方法。通过对目标星体指向、跟 踪仿真,得到轴系位置误差对指向、跟踪精度影响规律,为轴系精度及轴系位置要求提供理 论依据,并为后续控制修正提供参考模型。

关键词:地平望远镜;指向精度;跟踪精度;坐标变换;轴系误差 中图分类号:P121 文献标识码:A 文章编号:1672-7673(2011)02-0132-07

天文光学望远镜是大型高精密仪器,综合应用当代光学、精密机械和精密控制的最新技术和成 果,它是天文学家用来观测天空星体、探索宇宙奥秘的重要设备。高性能的天文望远镜除了要有好的 光学系统,还要有稳定、高精度的指向和跟踪系统<sup>[1]</sup>。随着望远镜对口径的要求越来越大,地平式 望远镜成为现代望远镜的主流,而研究影响望远镜指向精度和跟踪精度的因素是改进望远镜精确定位 的重要课题。望远镜的指向误差由很多因素造成的,包括大气折射、望远镜的制造和装配误差、望远 镜的重力变形以及因为温度变化引起的变形误差,望远镜的结构因素包括轴系的误差、镜筒的弯沉、 叉臂或轭架的变形等等都会影响望远镜的指向误差<sup>[2]</sup>。在所有的误差原因中绝大多数均有特殊的规 律,它们具有重复性的特点,但是即使有规律的变化因素,其表现形式以及反映在指向误差上的贡献 仍然很难掌握。本文以2米级地平式望远镜为例,应用球面几何的方法建立模型分析轴系结构位置误 差对天文望远镜指向精度和跟踪精度的影响,为轴系精度及轴系位置要求提供理论依据,为后续的控 制修正提供参考数据模型。

1 轴系位置误差对指向、跟踪精度影响的理论分析

仅考虑轴系结构位置误差引起的指向、跟踪误差,两者其实是一致的,只是轴系工作状态不同, 指向需要是高速、大角度范围,而跟踪是低速、小角度范围。误差产生的机理和计算公式相同,单位 角度范围内产生的误差值相同。

当轴系之间为理论位置时,方位轴转过角度 *A*,高度轴转动角度 *E*,光轴精确指向需要观测的目标天体 *T*,当存在轴系误差时,方位轴和高度轴分别转过相同角度,则光轴指向的位置为 *T*<sup>,</sup>,此时指向误差即为 *T*<sup>,</sup>T。下面分析轴系误差对地平式望远镜指向、跟踪精度的影响。

当高度轴水平误差为  $\alpha$ ,方位轴垂直误差为  $\beta$  时,如图 1, $\angle ZOP = \alpha$ , $\angle ZOZ' = \beta$ 。因为方位轴 垂直误差方向可能是任意方向,所以 Z'所在的位置是以 Z 为圆心,弧 ZZ'为半径旋转的某位置,如图 1 中靠近 Z 点的虚线轨迹。现以 Z 点、Z'点和 P 点在同一段大圆弧上为初始位置,Z'实际位置为绕 Z 点顺时针转过角度  $\gamma$ 。

作者简介:马锦,男,硕士,研究方向:天文仪器,Email: jungle09@163.com

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2010-03-09; 修定日期: 2010-03-25

在天文  $\Delta ZZ'P$  中,根据余弦定理得:

 $\cos Z' P = \cos\alpha \cos\beta + \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma \tag{1}$ 

#### 根据正弦定理得:

$$\frac{\sin Z'P}{\sin\gamma} = \frac{\sin\beta}{\sin\angle ZPZ'}$$

即

$$\sin \angle ZPZ' = \frac{\sin\beta\sin\gamma}{\sin Z'P}$$





在天文  $\Delta T'Z'P'中,有关系<math>\angle T'P'Z'=90^\circ - \angle ZPZ', Z'P'=Z'P$ 

根据余弦定理得:

$$\cos T'Z' = \cos Z'P'\cos E + \sin Z'P'\sin E\cos \angle T'P'Z'$$
(3)

根据正弦定理得:

$$\frac{\sin E}{\sin \angle T^{\prime}Z^{\prime}P^{\prime}} = \frac{\sin T^{\prime}Z^{\prime}}{\sin \angle T^{\prime}P^{\prime}Z^{\prime}}$$

即

$$\sin \angle T'Z'P' = \frac{\sin E \sin \angle T'P'Z'}{\sin T'Z'}$$
(4)

在天文  $\Delta T'Z'Z$ 中,有关系 $\angle T'Z'Z = 360^{\circ} - \angle ZZ'P - A - \angle T'Z'P'$ 根据余弦定理得:

$$\cos T' Z = \cos\beta \cos T' Z' + \sin\beta \sin T' Z' \cos \angle T' Z' Z$$
(5)

根据正弦定理得:

$$\frac{\sin T^{\prime}Z^{\prime}}{\sin \angle T^{\prime}Z^{\prime}Z} = \frac{\sin T^{\prime}Z^{\prime}}{\sin \angle T^{\prime}ZZ^{\prime}}$$

即

$$\sin \angle T'ZZ' = \frac{\sin T'Z'\sin \angle T'Z'Z}{\sin T'Z}$$
(6)

在天文  $\Delta SZS$  个,根据余弦定理得:

$$\cos TT' = \cos TZ \cos T'Z + \sin TZ \sin T'Z \cos(90^\circ + A - \gamma - \angle T'ZZ')$$
(7)

根据(1)、(3)、(6)求出的 *TZ* 值、*T´Z* 值和 $\angle$ *T´ZZ´*值代入(7),即可求出轴系综合误差对指向 误差的影响。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2)

## 2 轴系位置误差检测及数据处理

2.1 方位轴垂直误差的检测及数据处理







图 3 根据最小二乘法拟合数据 Fig. 3 Data constructed according to the Least-squares fit

如图 2,2 米级天文望远镜方位轴线与底座油垫面垂直,所以测量油垫面的水平度即为方位轴垂 直度误差,在油垫块1和2中间位置架等高块,等高块上架平尺,两等高块间距 800 mm,合像水平 仪放在平尺中间,水平仪的刻度为 0.01 mm/m 测量出两个油垫块的高低。以此类推测量出 12 个油垫 块的高低,测得的数据见表 1。用最小二乘法,根据点到平面的距离平方和最小,拟合如图 3,根据 底座直径为 4 m,所以拟合平面与水平面的夹角为  $\theta$ ,有关系  $\tan \theta = \frac{2.1 \times 10^{-2}}{4.0 \times 10^3}$ ,即  $\theta \approx 1.09''$ ,方位 轴系的垂直差为 1.09''。

	表 I 低 性 出 垫 面 测 重 值									
	Table 1	Measu	rements	of the su	irface of	the oil n	nat on th	e base		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

位置点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
测量值/μm	0.0	0.0	4.8	4.8	4.8	9.6	25.6	25.6	0.0	4.0	4.0	4.0

2.2 高度轴水平误差的检测及数据处理







如图 4,在高度轴 A, B 两端的外侧与内侧分别架上十字丝,通过转动中间块使得 4 个十字丝分 别调到各轴头的旋转中心。然后利用调好中心的前后两个十字系丝,将自准直测量望远镜准直到该轴 头的旋转轴线上<sup>[3]</sup>,先准直到 A 轴头记下测量望远镜自身的位置值,再准直到 B 轴头,此时测量高 度轴 A、B 两头十字丝的高低差即为高度轴水平差。自准直仪的刻度为 0.02 mm,测量出的高低差为 一格,即为 0.02 mm,换算得高度轴水平误差近似为 1.1"。

## 3 建模仿真

建立了轴系位置误差对指向精度的模型,根据实际检测出的2米级地平式望远镜轴系位置误差代 入已建立模型中进行指向、跟踪仿真。

3.1 赤道坐标与地平坐标之间的转化

以上分析均基于地平坐标系而言,而天体的坐标以赤道坐标表示,在对目标星体的位置坐标及运 行轨迹做指向和跟踪的建模仿真时必须把坐标值从天球坐标系转化到地平坐标系。

如图 5, X 为观测目标,设已知赤道坐标里赤纬 $\delta$ 和时角t,求地平坐标<sup>[4]</sup> 里天定距z和方位角A:

根据余弦公式得  $\cos z = \cos(90^\circ - \varphi) \cos(90^\circ - \delta) + \sin(90^\circ - \varphi) \sin(90^\circ - \delta) \cos t$ ,即:

$$\cos z = \sin \varphi \cos \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \tag{8}$$

根据正弦公式得 $\frac{\sin(90^\circ - \delta)}{\sin(180^\circ - A)} = \frac{\sin z}{\sin t}$ ,即

 $\sin z \sin A = \cos \delta \sin t$  (9)

以及第一五元素公式可得

$$\sin z \cos(180^{\circ} - A) = \cos(90^{\circ} - \delta) \sin(90^{\circ} - \varphi) - \sin(90^{\circ} - \delta) \cos(90^{\circ} - \varphi) \cos t , \ \blacksquare:$$
$$\sin z \cos A = -\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \sin \varphi \cos t$$
(10)

在观测地点的纬度已知,天定距 z 和方位角 A 就可以唯一确定了。

#### 3.2 指向误差的仿真

找一组分布于天球的若干目标,转动方位轴和高度轴使 光轴依次指向不同目标星体,由于轴系之间存在位置误差, 每颗星的实测位置与期望位置存在一定偏离,即为指向误差。 在地平坐标系中采用方位角(θ°~360°)每隔75°,高度角 (天顶距10°~70°)每隔10°作为观测位置,统计偏离数据见 表2。由表2可以看出,在方位轴垂直误差与高度轴水平误差 分别在1″左右时,其对望远镜在全天区范围内指向误差贡献 最大值为3.3″。

3.3 跟踪误差仿真

选择观测地理纬度为40°,分别对赤纬从10°~80°,每隔 10°作一次连续24 h 跟踪次仿真,每隔1 s 记录一次数据,仿 真流程如图6。节选赤纬为60°和30°跟踪误差仿真图如图7~ 8。图7和图8分别为轴系综合误差,赤纬为60°和30°时跟踪 误差的仿真图。





表 2 观测位置的指向误差

8卷

	Table 2    Pointing errors at different directions									
No.	A/°	Z/°	$\Delta / ''$	No.	A/°	Z/°	$\Delta / ''$			
1	0	10	3. 23	19	225	40	1.33			
2	75	10	2.65	20	300	40	2.30			
3	150	10	1.34	21	0	50	2.11			
4	225	10	1.60	22	75	50	1.91			
5	300	10	2.85	23	150	50	0. 97			
6	0	20	3.08	24	225	50	1.19			
7	75	20	2.55	25	300	50	2.00			
8	150	20	1.29	26	0	60	1.64			
9	225	20	1.54	27	75	60	1.62			
10	300	20	2.74	28	150	60	0. 82			
11	0	30	2.84	29	225	60	1.05			
12	75	30	2.39	30	300	60	1.66			
13	150	30	1.21	31	0	70	1.12			
14	225	30	1.45	32	75	70	1.35			
15	300	30	2.55	33	150	70	0. 69			
16	0	40	2. 51	34	225	70	0. 91			
17	75	40	2.17	35	300	70	1.33			
18	150	40	1.10							
05	高度输方位输	误差同时存在			高度输方位	袖同时存在误差				
0 05- -1- 報:15- -25- -30 1	2 3 4 F(II)/s	5 6 7	8 9 x 10 <sup>4</sup>	08 06 06 06 08 02 日 日 田 0 日 0 日 0 日 0 日 日 0 日 日 0 日 日 0 日 日 0 日 日 0 日 日 0 日 日 0 日 日 0 日 日 0 日 日 0 日 日 0 日 日 0 日 日 日 0 日	1 2 3 4 P†f	5 6 7	8 9 x 10 <sup>4</sup>			
	图7 赤纬为6	0°跟踪误差			图 8 赤纬为 30°跟踪误差					
Fig. 7	Tracking error	at Declination 6	)°	Fig.	Fig. 8 Tracking error at Declination 30°					

根据上述仿真图形得(其余具有相同的规律,具体数据如表 3)得: 在做 24 h 连续跟踪时,跟踪误差具有周期性; 方位轴的垂直误差对跟踪精度影响较高度轴水平误差对跟踪精度的影响大; 在地方 纬度和赤纬之和为 90°是跟踪误差的均方根值最大,变化最剧烈,赤纬增大或者减小跟踪误差值变化 趋于平缓。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表3 轴系位置误差引起跟踪误差

Table 3         Shaft position error caused by the tracking error							
赤纬/°	Max/"	Min/"	RMS/"	赤纬/°	Max/"	Min/"	RMS/"
10	1.16	0	0. 23	50	3. 23	0	1.00
20	0.73	0	0.39	60	2.51	0	0.84
30	0. 98	0	0.58	70	1.72	0	0.60
40	3.08	0	0.83	80	0.87	0	0.31

选择地方纬度为 40°时观测,由上面推论得:赤纬为 50°时跟踪误差变化最剧烈。现分别在变化 最剧烈时作 1 min、10 min 的短周期开环跟踪和 2 h 长周期闭环跟踪,仿真图形如图 9~11。



图 9 跟踪 1 min 仿真图



分析仿真数据可以得到当轴系位置误差在 1"左右 时,其对跟踪、指向的影响结果如下:

(1) 全天区指向,可能出现对指向误差最大贡献值(方位角变化 360°,高度角变化 90°)为 3.3";

(2) 跟踪误差变化最剧烈时, 1 min 内对跟踪误差的贡献值 RMS 为 0. 0014";

(3) 跟踪误差变化最剧烈时, 10 min 内对跟踪误差的贡献值 RMS 为 0. 015";

(4) 跟踪误差变化最剧烈时, 2 h 内对跟踪误差的 贡献值 RMS 为 0. 149"。

当轴系位置误差在1"左右时,其对指向的影响比较



图 10 跟踪 10 min 仿真图

Fig. 10 Simulated tracking errors within ten minutes



### 4 结 论

Fig. 11 Simulated tracking errors within two hours

图 11

跟踪 2 h 仿真图

大,需要控制系统在指向模型中加以校正;而对与小于 10 min 的短周期开环跟踪,其影响非常小,可以忽略;对于长周期闭环跟踪,其产生的误差将被导星系统加以校正,其影响也可以忽略。

如若把轴系位置误差放大一倍,指向误差最大为 6.27″,小于实际轴系误差对指向误差贡献的 2 倍。跟踪误差变化最剧烈时,不同跟踪时间对跟踪误差的贡献如表 4,相当于实际轴系误差对跟踪误 差贡献的两倍,其对跟踪精度造成的影响仍然可以忽略。

表4 轴系误差放大一倍跟踪均方根值

Table 4 RMS of tracking when the shaft error is doubled

跟踪时间	RMS/"
1 min	0. 003
10 min	0. 029
2 h	0. 298

#### 参考文献:

[1] 王国民. 天文光学望远镜轴系驱动方式发展概述 [J]. 天文学进展,2007,25(4):364-374.

Wang Guomin. Review of D Rive Style for Astronomical Optical Telescope [J]. Progress in Astronomy, 2007, 25(4): 364-374.

- [2] 程景全. 天文望远镜原理和设计 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 118-119.
- [3] 翟嘉,胡企千,吴金虎. 地平式望远镜高度轴回转精度检测与计算方法 [J]. 机械制造, 2008,46(3):65-67.
  Zhai Jia, Hu Qiqian, Wu Jinhu. Rotary Precision Detection of Altitude Axis and Calculation Method of Alt-Az Telescope [J]. Machinery, 2008, 46(3):65-67.
- [4] 戴文赛. 天文学教程 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1961: 104-105.

# Effects of the Shaft Error of an Altazimuth Telescope on Pointing and Tracking Accuracies

Ma Jin<sup>1 2 3</sup>, Gu Bozhong<sup>1 2</sup>

 National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China; 2. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical

Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;

3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China, Email: jungle09@163.com)

**Abstract**: It is a new tread to use altazimuth telescopes to increase diameters of modern astronomical telescopes. This paper adopts the spherical geometry to deduce how the shaft error of an altazimuth telescope affects its pointing and tracking accuracies. We describe the detection of the shaft errors of 2m-class telescopes and the processing of such detected data. This paper evaluates the impact of shaft error on pointing and tracking from simulations of pointings and trackings of a target star under the influence of the shaft error. The evaluation can provide theoretical basis for the requirements of the alignment of telescope axis , and provide reference for followed-up corrections of control systems.

**Key words**: Altazimuth telescope; Pointing accuracy; Tracking accuracy; Coordinate transformation; Shaft error