第 44 卷 第 2 期 天 文 学 报 Vol.44 No.2
2003 年 5 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA May, 2003

1.2 米地平式望远镜指向模型的研究 (1. 全天指向模型的建立)*

郑向明 王 武 张云成 冯和生

(中国科学院国家天文台云南天文台 昆明 650011)

摘要 介绍了云南天文台 1.2 米地平式望远镜用于天文观测和图像采集处理的方法, 建立了新的、独特的全天指向模型, 大大提高了该望远镜的指向精度, 达到 $1''$, 并在多年的实际应用中得到验证.

关键词 天文仪器: 望远镜, 天文技术: 图像处理, 天文方法: 数据分析

中图分类号: P 111

1 引言

1.2 米望远镜属地平式装置, 系两轴跟踪, 分别用来测量卫星和恒星的方位角 A 、天顶距 Z 和相应的时刻 T.

该望远镜的大型机架是长春光机所上世纪 70 年代初期研制生产的, 因各种原因, 该机架闲置多年, 直到 80 年代初云南天文台激光测距组把该机架运到本台进行了技术改造. 经过 10 年的努力, 将其改造成为目前国内最大的地平式望远镜 (口径 1.2 米), 它是一台高指向精度 ($\pm 1''$)、高跟踪精度的系统, 集各种功能为一体的天文望远镜.

该望远镜已经投入到自适应光学、地壳运动网络、激光测距多个学科的使用中. 例如: (1) 成都光电所大气光学国家重点实验室利用该望远镜做了 21 单元自适应光学补偿试验, 是继美国、德国之后的第 3 个获得成功的国家. (2) 该望远镜建立的激光测距系统, 已参加国际、国内联测网络, 并提供多颗激光测距卫星资料, 测距精度为 ± 3 厘米, 特别是已测到了在国际上一致公认非常难测的 GPS35 、 GPS36 远程卫星 (2 万公里以上). 由于该望远镜已建立了数学指向模型, 采用了精密指向修正, 激光测距系统可在小范围内搜索, 即做到盲目跟踪测距, 为下一步开展白天测距和激光测月打下基础.

1.2 米地平式望远镜用于目标精密定位和卫星激光测距, 主要依靠高精度的天文星表和预报, 以及优良的望远镜轴系, 通过天文观测方法和图像采集处理技术, 精确求出视轴指向的偏差. 对于一个由好的轴系 (随机晃动小) 、可靠的编码器和稳定的光学系统组成的定向装置, 其系统偏差可根据产生的部件和原理, 用适当的数学模型予以修正, 修正后指向精度可大大提高.

2002-12-31 收到原稿, 2003-03-20 收到修改稿

*863-308 专题, 云南省自然科学基金 (项目编号: 2002A0017R) 资助项目

2 误差分析

众所周知，望远镜在制造、装配、标校、安装环境及温度的变化等多方面的原因，都会引入误差.

对一台地平式望远镜而言，存在两大类误差：

(1) 偶然误差

i) 风对水平轴的影响；

ii) 轴系无规则的晃动；

iii) 环境及温度变化引起的误差；

iv) 数字显示的误差 (数显表零点差).

(2) 系统误差

i) 极偏 (垂直轴与铅垂线不重合)；

ii) 水平差 (水平轴与水平线的倾斜)；

iii) 重力作用下的机械变形带来的误差 [1].

综合以上误差源可以看出，导致望远镜标定的指向位置与天空中实际方向位置之间的偏离 (差), 是理论值与实际指向位置存在偏差量. 上述误差源引起的偏离，如不考虑偶然误差都均为系统误差，原则上，它们可以通过实测逐个求出，并予以修正，然而它们均是与望远镜位置状态有关的量，即是位置的函数. 我们用 ΔA 、 ΔZ 两个量表示望远镜的方位及天顶距，相应的 A 、 Z 表示偏差，则有：

$$\Delta A = F_A(A, Z), \quad \Delta Z = F_Z(A, Z).$$

我们称 F_A 、 F_Z 为指向改正函数，它们应该是定义在球面上的连续函数. F_A 、 F_Z 可以根据其产生的物理和几何模型逐项求得. 但是由于多种因素错综复杂，交替影响，这样做很困难，即使各项精度较高，而合并在一起的系统精度也不会高.

3 全天指向模型

3.1 全天指向模型原理

在当今测量及计算功能、方式和方法不断发展的情况下，更为有效的方法是，通过对全天均匀分布的天体，测量出望远镜标定的观测位置 A_O 、Z_O，以及由高精度星历表计算出的位置 A_C 、Z_C，从而可计算出在各个方向上的指向偏差 $A = A_O - A_C$ 、$Z = Z_O - Z_C$，对这些分布在半球面上的离散值进行拟合，可求得改正函数：

$$F_A(A, Z), \quad F_Z(A, Z).$$

由于 F_A 、F_Z 是定义在球面上的连续函数，因此我们认为用球谐函数来表示它们是合理的. 球谐函数各阶次的系数可通过最小二乘法求得. 由于在观测中获得的指向偏差包括

了系统差及观测偶然误差，所以拟合值代表了系统差，观测个别值与拟合值之差 —— 称做残差 μ_i, 它代表了观测偶然误差，用总误差：

$$M=\sqrt{\frac{\sum \mu_i^2}{n-r}}$$

来衡量望远镜经过系统修正后的指向精度，其中 n 为观测星数， r 为球谐函数中待定系数的个数.

3.2 全天指向模型的最优化形式

在找到并了解了影响指向精度的各种因素后，需要进一步考虑用何种形式的球谐函数更能客观真实地反映指向修正模型. 我们选择的基本原则是，它既具有合理的物理意义，也有在数值分析上残差平方和达最小且无明显的区域分布.

如前所述，在望远镜指向的系统差中包括了机架的垂直差、水平差、视轴与机械轴的偏差、角编码器偏心差、零点差等等，它们产生的影响对方位而言都是一次的；而在镜筒指向不同天顶距时重力作用对视轴及机械轴的影响，将是随天顶距的变化变为复杂函数，需采用高次项拟合才合理，高阶的截断准则是残差的分布不再有明显的区域性. 最后选取一个取到四阶的带谐项和相应各阶均只一次田谐项球谐函数. 其全天指向模型的形式为：

$$\begin{aligned}\Delta A\sin Z &= A_0+A_1\cos Z+A_2\cos A\sin Z+A_3\sin A\sin Z+A_4\cos^2 Z\\ &\quad +A_5\cos A\cos Z\sin Z+A_6\sin A\cos Z\sin Z+A_7\cos^3 Z\\ &\quad +A_8\cos A\sin Z\cos^2 Z+A_9\sin A\sin Z\cos^2 Z\\ &\quad +A_{10}\cos^4 Z+A_{11}\cos A\sin Z\cos^3 Z+A_{12}\sin A\sin Z\cos^3 Z\,,\end{aligned}$$

$$\Delta Z=B_0+B_1\cos Z+\ldots\ldots+B_{12}\sin A\sin Z\cos^3 Z\,.$$

3.3 全天指向模型的定点观测法

对 FK5 星表中选取的全天均匀分布的恒星进行定点观测，用定点观测法取代跟踪观测法.

定点观测法即为：将望远镜按要观测恒星的预报方位和高度到位，由于恒星以 $15''\cos\delta/\mathrm{s}$ 的周日运动速度在天上移动，当它进入视场后，进行连续的图像采集，每秒采集存下一幅图像，每次观测采集 10 幅图像. 若将 10 幅图像叠加在一起，即构成一个 “星迹串”(如图 1). 每个星点的成像时刻均已记录在该图上，因此可构成函数 $X(t)$ 、 $Y(t)$, 由于是在一个约 $3'$ 的小视场内，描述星迹的运动用二次函数已足够精确，即：

$$X(t)=a_0+a_1t+a_2t^2\,,$$

$$Y(t)=b_0+b_1t+b_2t^2\,.$$

二次式的系数可通过 10 幅图像的观测值拟合求得，并用拟合残差来衡量观测的内符合精度. 实测表明，这种观测方法的定位误差绝大多数优于 0.5 个像元，相当于 0.″18. 而且，用 10 个点来拟合求出某个时刻的星像位置，它不仅避免了跟踪带来的误差，而且也减少了大气抖动的影响，即可认为消除了观测过程中的偶然误差.

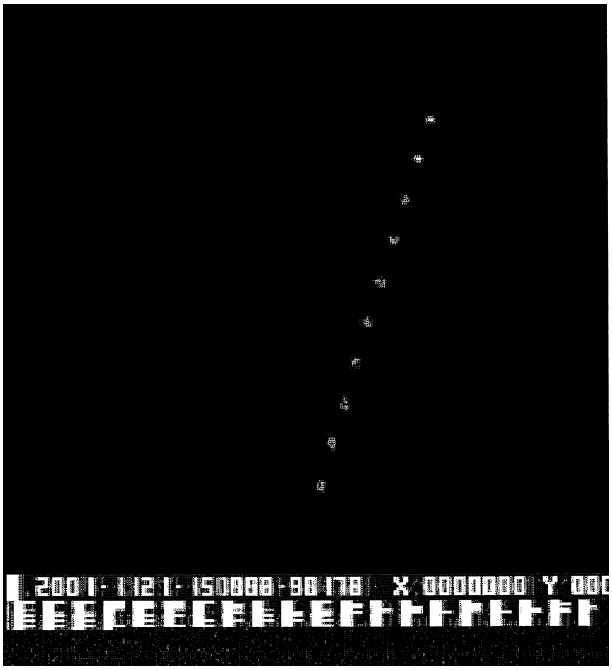

图 1　10 幅图像叠加在一起构成的“星迹串”

Fig. 1　“star tracing”of 10 folded images

4　结论和讨论

我们在 FK5 星表中搜索尽可能多的、在天空中呈均匀分布的恒星进行观测，建立全天指向模型，用球谐函数修正这些误差. 在实际观测中，我们采用方位角 (0°—360°) 每隔 30° 左右，高度角 (天顶距 20°—70°) 每隔 10° 左右找一颗恒星，对不少于 48 颗星建立全天指向模型. 表 1 是某一次选取 61 颗恒星建立全天指向模型的观测资料和资料处理的中间结果.

表 1 61 颗恒星的资料

Table 1 Data of 61 stars

No.	A	Z	μ_{Asinz}	μ_z	No.	A	Z	μ_{Asinz}	μ_z
1	0.4895	64.3181	−1.47	−0.67	31	150.3175	27.9070	−2.15	−5.39
2	358.7650	39.1432	1.10	−1.58	32	151.6590	37.8251	−0.61	−4.26
3	3.0327	28.0375	1.77	−2.72	33	149.5069	48.1812	−2.21	−3.78
4	356.4722	21.0593	0.96	−3.05	34	146.3479	61.7336	−0.43	−4.16
5	358.7127	11.7272	3.34	−1.04	35	181.4087	63.6386	0.06	−1.30
6	38.1852	11.6362	2.32	0.31	36	179.7011	48.9261	5.32	−0.92
7	25.6931	19.3537	2.70	−1.51	37	180.3415	40.3499	3.07	0.93
8	26.7380	30.4114	3.83	1.58	38	181.1449	29.1561	5.75	1.95
9	30.1971	40.0398	0.21	1.61	39	175.5223	16.2489	−0.38	−0.11
10	32.3672	50.0488	−1.54	2.79	40	175.5905	9.7997	4.95	−2.71
11	29.9805	60.6404	3.53	1.25	41	208.8859	8.2017	6.22	−0.67
12	58.6716	58.7459	4.37	−0.49	42	204.3399	21.2415	4.67	3.52
13	59.8041	52.2330	2.18	−0.14	43	206.6780	30.7310	4.35	2.57
14	62.4359	40.4800	−1.34	1.73	44	208.4274	39.2867	0.77	3.80
15	55.9218	29.8591	2.92	0.90	45	211.4878	49.2415	−0.23	4.82
16	56.3029	20.6168	0.75	2.07	46	207.4860	60.6617	2.40	6.07
17	83.8282	11.2101	−1.73	0.45	47	273.8859	21.8272	−3.45	1.53
18	85.6632	18.5443	−2.94	1.00	48	265.5721	29.3131	−0.88	0.38
19	92.7005	31.7657	1.03	1.96	49	270.7344	36.9774	−4.09	−3.40
20	89.5231	38.2636	0.32	1.46	50	328.2713	12.1522	−1.63	2.57
21	88.5913	50.9044	−1.04	−1.50	51	328.4211	18.3910	−1.67	1.87
22	90.4253	61.3816	−3.62	3.29	52	334.5297	30.2431	3.24	−0.70
23	117.6863	59.0132	−0.63	−0.66	53	327.6809	40.3178	2.78	0.46
24	117.3225	48.1119	−4.99	−0.81	54	327.8147	49.6035	−0.62	1.40
25	120.9095	41.6457	−2.57	−0.85	55	326.7805	53.9688	0.58	0.47
26	119.8026	28.7282	−1.38	0.07	56	291.9463	12.2323	−2.47	0.60
27	122.0952	21.6893	−6.92	1.23	57	304.1255	20.4591	−6.50	−3.06
28	119.3585	8.2656	−2.89	4.32	58	297.5065	29.0312	−2.49	0.83
29	152.8050	8.0819	−1.01	−2.55	59	299.7082	38.9621	−2.72	−1.19
30	145.6325	19.6612	−4.77	−4.06	60	299.7295	51.6878	−0.54	−1.30
					61	296.2296	56.1086	−3.59	−3.47

下面为这次建立全天指向模型所确定的指向修正系数:

$A(1) = -1029.57$ $A(2) = 5575.82$ $A(3) = 22.12$ $A(4) = -56.85$
$A(5) = -13124.42$ $A(6) = -80.95$ $A(7) = 262.54$ $A(8) = 13249.50$
$A(9) = 106.57$ $A(10) = -366.64$ $A(11) = -5021.89$ $A(12) = -50.98$
$A(13) = 181.91$
$B(1) = 184.99$ $B(2) = -171.19$ $B(3) = 97.29$ $B(4) = 90.99$
$B(5) = -335.13$ $B(6) = -482.03$ $B(7) = -432.03$ $B(8) = 701.02$
$B(9) = 781.45$ $B(10) = 670.17$ $B(11) = -349.23$ $B(12) = -421.47$
$B(13) = -337.60$

其观测拟合指向精度为：

$$M_{\mathrm{Asinz}} = 3.41 = 1.2'',$$

$$M_z = 2.78 = 1.00'',$$

$$1\ \mathrm{unit} = 0.36''.$$

该全天指向模型经过多年的验证，特别是和测角编码器小周期模型联合应用于激光测距中的表现，以及对卫星 Topex 进行跟踪定位精度的实测结果为 $1.4''$[2]，证明该模型是合理且成功的．表 2 为几次观测所得出的指向精度．

表 2　多次观测所得出的指向精度

Table 2　The accuracy of pointing from many times

Stars	$M_{\mathrm{Asinz}}('')$	$M_z('')$
61	1.23	1.00
75	1.33	1.31
69	0.91	1.17
Average	1.16	1.16

总之，经全天指向模型修正系统误差后，在方位角和高度角两个方向上的指向精度分别可达到：　$M_{\mathrm{Asinz}} = 1.16''$, $M_z = 1.16''$.

前面讲过，由于存在环境温度的变化等多方面的偶然误差，每次做的全天指向模型系数有一定的使用期限.

然而，在刚开始时，采用新的观测处理方法和全天指向模型得到的结果，仍然不能使精度有明显的提高，这迫使我们进一步考察望远镜自身存在某些误差．主要考虑了机械轴系的稳定性和机械轴与光轴之间是否存在游动，以及温度变化对望远镜整体影响的问题．我们采用一束与望远镜机架稳固连接在一起的由激光器产生的平行光束，通过望远镜光路成像于焦面探测器上，可监视到光路中每个部件的稳定性及运动均匀性．在观测室天窗关闭和开启时，进行了长时间 (最长为 24 小时) 的在不同温度环境下的观测，每隔一分钟采集一次激光点在 CCD(探测器) 上的坐标，用测量值对平均值的弥散程度来衡量光点位置的稳定性．同时，采用在固定方位上对不同天顶距位置测量激光点坐标的变化，具体做法是：在选定的方位上，望远镜从天顶距 2 度开始，然后是 4 、 6 、 10 、 20 一直到 70 度共 10 个高度位置，每一个位置测定一次激光点的坐标，如此进行 12 次，同一天顶距位置有 12 个坐标测定值，用它们对平均位置的弥散度来衡量复位精度.

随着本工作的开展和进一步的研究，发现并解决了机械轴系、光轴以及温度影响的一些问题，同时发现了测角编码器存在细分误差，为此，提出了解决数显电路细分误差的测角编码器小周期模型 (将有文章进行专门讨论) 以及解决提高小天区范围内指向精度的局部指向模型 (将有文章进行专门讨论).

参 考 文 献

1 张云成. 云南天文台台刊, 1998, 75(4): 66-69
2 郑向明, 张云成, 姜崇国等. 云南天文台台刊, 2001, 88(4): 36-41

Pointing Model Study of the 1.2 m Telescope (1. Establishment of Global Pointing Model)

ZHENG Xiang-Ming WANG Wu ZHANG Yun-Cheng FENG He-Sheng
(*Yunnan Observatory, National Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming* 650011)

Abstract A new distinctive global pointing model was built using astronomical observation to sample and process images at the 1.2 m Alt-Az telescope in Yunnan observatory. The pointing accuracy is greatly improved to 1″. This model was validated in actual applications for many years.

Key words Astronomical instrumentation: Telescopes, Astronomical Techniques: image processing, Astronomical Methods: data analysis