第 47 卷 第 2 期　　天 文 学 报　　Vol.47 No.2
2006 年 4 月　　ACTA ASTRONOMICA SINICA　　Apr., 2006

65 cm 水平式望远镜静态指向模型*

平一鼎　张晓祥　鲁春林

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

摘要　由于传统的静态指向模型对于水平式装置存在法方程条件差的困难，针对紫金山天文台盱眙站 65 cm 水平式空间碎片望远镜，基于真实的可能产生误差的来源建立了独特的静态指向模型，使模型参数具有明确的物理意义，从而基本剔除了望远镜的系统误差，大大提高了该望远镜的指向精度，达到了 $4''$.

关键词　**天体测量学：望远镜，指向模型**

中图分类号：　P 111;　　**文献标识码**：　A

1　引言

紫金山天文台盱眙观测站 65 cm 空间碎片望远镜采用水平式装置. 光学系统采用大视场、强光力的施密特系统. 主镜 75 cm, 改正镜 65 cm, 望远镜焦比为 1.5. 焦距为 97 cm, 单片改正镜, CCD 前有平场镜. 该望远镜的主要任务为空间碎片观测，是国内目前口径最大、光力最强的空间碎片望远镜. 整个系统已在测站安装完成，目前正处于最后的调试中，即将投入正式使用.

由于望远镜制造、安装过程中的各种原因，望远镜指向的读数与实际视场中心位置之间总会存在一定的差异，这就是望远镜的静态指向误差. 该误差是卫星观测图像资料的主要误差之一，在我们对图像资料进行处理尤其是对目标进行天文定位时，会带来比较大的困难. 这就需要我们建立静态指向模型来对误差进行修正.

2　误差来源

一般而言，望远镜由于制造、加工、装配、 CCD 和码盘的安装以及环境温度、湿度等多方面的原因，会引入误差.

对于一台水平式望远镜，主要存在以下几个误差源：

(1) 光轴与纬轴不垂直带来的误差;

(2) 望远镜置平、南北向的指向误差;

(3) 经轴与纬轴不垂直带来的误差;

(4) 码盘安装误差;

2005-02-24 收到原稿，　2005-03-24 收到修改稿

* 国家自然科学基金重点项目 (10333050) 、国家自然科学基金 (10503013) 资助项目

(5) 重力作用下的机械变形带来的误差;

(6) 数显表的零点差.

导致望远镜指向位置的读数值与天空中实际方向位置的偏离，是理论值与实际指向位置存在偏差. 由上述误差源引起的偏离，都是系统差，原则上都可以通过建立模型来求出，并进行修正.

3　静态指向模型

传统的指向模型一般可以用球谐函数来建立，这在地平式和赤道式装置中经常得到使用. 通常在球谐函数模型中，带谐项取到四阶，田谐项取到一阶. 对于水平式装置，具体的形式可表达为:

$$\begin{aligned}\Delta L\cos B \;=\;& A_0 + A_1\sin B + A_2\cos L\cos B + A_3\sin L\cos B + A_4\sin^2 B + \\ & A_5\cos L\sin B\cos B + A_6\sin L\sin B\cos B + A_7\sin^3 B + \\ & A_8\cos L\sin^2 B\cos B + A_9\sin L\sin^2 B\cos B + A_{10}\sin^4 B + \\ & A_{11}\cos L\sin^3 B\cos B + A_{12}\sin L\sin^3 B\cos B\,, \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}\Delta B \;=\;& B_0 + B_1\sin B + B_2\cos L\cos B + B_3\sin L\cos B + B_4\sin^2 B + \\ & B_5\cos L\sin B\cos B + B_6\sin L\sin B\cos B + B_7\sin^3 B + \\ & B_8\cos L\sin^2 B\cos B + B_9\sin L\sin^2 B\cos B + B_{10}\sin^4 B + \\ & B_{11}\cos L\sin^3 B\cos B + B_{12}\sin L\sin^3 B\cos B\,. \end{aligned} \tag{2}$$

一般情况下，特别是对赤道式装置和地平式装置来说，用球谐函数建立静态指向模型可以达到较好的精度要求 [2,3]. 但是对于水平式装置来说，由于观测范围不含有两个极区附近的值，法方程条件比较差，因此求解球谐函数时无法得到很好的解，所得到的结果精度会比较差. 我们使用球谐函数模型的方法对一组观测数据进行了计算，得到一组模型系数的解后， L 、 B 轴的拟合精度分别为 $39.74''$ 和 $24.66''$, 远远无法满足实际应用的需要.

此外，由于模型系数过多，系数相关性大，模型的稳定性比较差，不同组的观测数据往往会得到大不相同的系数. 而且系数没有明确的物理意义，因此不能认为这是一个很好的模型. 有必要建立一个简明而有明确物理意义，同时能够避免缺少极区观测资料的模型.

我们从实际物理意义出发建立一个模型，图 1 为模型的三、四两项.

(1) 零点差:

$$\Delta L\cos B = a_0\cos B,\quad \Delta B = b_0\,. \tag{3}$$

(2) 光轴与纬轴不垂直 (相当于地平式装置中的准直差):

$$\Delta L\cos B = \mathrm{d}x,\quad \Delta B = \mathrm{d}y\,. \tag{4}$$

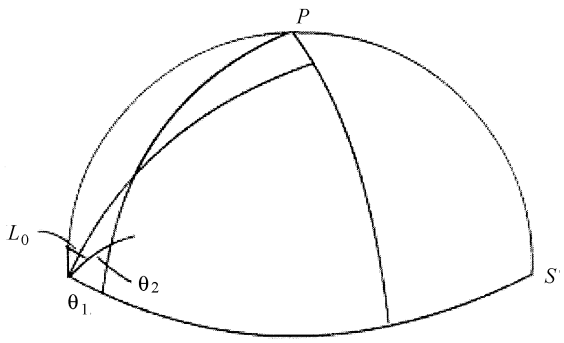

图 1 模型三、四两项

Fig. 1 the third and fourth part of the model

(3) 纬轴与经轴不垂直:

$$\Delta L\cos B = q_1 \sin B\,. \tag{5}$$

(4)L 轴指向误差:

$$\Delta L = q_2 \sin(L - L_0)\sin B\,, \quad \Delta B = q_2 \cos(L - L_0)\,. \tag{6}$$

(5) 码盘偏心:

$$\Delta L = \frac{\varepsilon_1}{r}\sin(L - L_0), \quad \Delta B = \frac{\varepsilon_2}{r}\sin(B - B_0)\,. \tag{7}$$

由此我们可以建立水平式装置的静态指向基本参数模型:

$$\begin{aligned}\Delta L\cos B \;=\;& A_0 + A_1\sin B + A_2\sin L\cos B + A_3\cos L\cos B + \\ & A_4\sin L\sin B + A_5\cos L\sin B + A_6\cos B\,,\end{aligned} \tag{8}$$

$$\Delta B \;=\; B_0 + B_1\sin B + B_2\cos B + B_3\sin L + B_4\cos L\,. \tag{9}$$

其中: $A_0 = \mathrm{d}x$, $A_1 = q_1$, $A_2 = \varepsilon_1\cos L_0/r$, $A_3 = -\varepsilon_1\sin L_0/r$, $A_4 = q_2\cos L_0$, $A_5 = -q_2\sin L_0$, A_6 为零点差的系数.

$B_0 = \mathrm{d}y$, $B_1 = \varepsilon_2\cos B_0/r$, $B_2 = -\varepsilon_2\sin B_0/r$, $B_3 = q_2\cos L_0$, $B_4 = q_2\sin L_0$.

以上参数都具有明确的物理意义, 基本可以描述水平式望远镜的主要误差来源.

4 观测和计算

在星表中选取全天均匀分布的恒星进行跟踪观测, 得到恒星的理论位置 L_0 、 B_0 和测量位置 $L_{\rm obs}$ 、 $B_{\rm obs}$. 表 1 为某一次选取 47 颗恒星建立静态指向模型的观测资料.

表 1　47 颗恒星的资料

Table 1　Data of 47 stars

NO.	$L_{\rm obs}(^\circ)$	$B_{\rm obs}(^\circ)$	$L_0(^\circ)$	$B_0(^\circ)$	$\Delta L\cos B_{\rm obs}(''')$	$\Delta B(''')$
1	14.70701	−1.47641	14.70489	−1.48054	−7.63	−14.84
2	38.18421	2.10617	38.18619	2.09719	7.12	−32.32
3	65.29372	1.44684	65.29014	1.43385	−12.87	−46.78
4	71.52562	2.47480	71.51860	2.46089	−25.22	−50.06
5	72.34923	−26.86981	72.33510	−26.88246	−45.37	−45.51
6	61.48772	−25.43797	61.47688	−25.44873	−35.23	−38.74
7	48.75286	−21.42780	48.74549	−21.43725	−24.67	−34.02
8	25.89620	−13.55123	25.89073	−13.55802	−19.15	−24.43
9	−5.39098	−58.85203	−5.42288	−58.85191	−59.41	0.45
10	11.69646	−45.30125	11.67784	−45.30422	−47.14	−10.68
11	11.55473	−31.09541	11.54295	−31.10093	−36.29	−19.85
12	10.14003	−24.91774	10.12967	−24.92278	−33.81	−18.14
13	−13.60068	−21.68813	−13.61769	−21.69148	−56.88	−12.02
14	−14.28908	−31.93280	−14.30815	−31.93499	−58.26	−7.91
15	−36.31583	−43.88807	−36.34137	−43.88817	−66.25	−0.33
16	−49.81258	−52.75585	−49.83918	−52.75620	−57.97	−1.24
17	−63.95196	−30.92260	−63.97006	−30.92403	−55.88	−5.17
18	−58.64056	−22.74507	−58.65929	−22.74690	−62.18	−6.61
19	−37.24910	−18.32836	−37.26886	−18.32934	−67.51	−3.53
20	−22.60137	−20.12715	−22.62007	−20.12997	−63.19	−10.16
21	−36.42437	−18.60011	−36.44350	−18.60108	−65.26	−3.46
22	−53.90229	−2.25820	−53.91956	−2.26061	−62.12	−8.67
23	−53.68993	−3.60770	−53.70767	−3.60959	−63.76	−6.83
24	−64.87269	−3.59847	−64.88810	−3.60045	−55.33	−7.15
25	−74.06653	−5.75213	−74.07843	−5.75512	−42.63	−10.75
26	−69.40553	27.61265	−69.41611	27.61167	−33.74	−3.50
27	−59.81004	25.43526	−59.82345	25.43370	−43.61	−5.61
28	−47.07695	23.32950	−47.09193	23.32603	−49.54	−12.48
29	−30.20000	17.47344	−30.21363	17.47051	−46.78	−10.54
30	−15.47298	26.27971	−15.47964	26.27393	−21.51	−20.79
31	−26.85261	43.82018	−26.86232	43.81461	−25.23	−20.03
32	−36.38771	48.51318	−36.39778	48.51109	−24.00	−7.54
33	−55.33405	54.97072	−55.34284	54.96988	−18.16	−3.02
34	−8.19106	61.32498	−8.18652	61.31724	7.84	−27.84
35	−1.96288	44.35860	−1.96143	44.35027	3.75	−29.98
36	3.72631	24.65881	3.72618	24.65154	−0.40	−26.19
37	11.08647	20.84682	11.08817	20.83769	5.70	−32.87
38	22.90388	32.58761	22.90954	32.57766	17.18	−35.83
39	37.00919	39.40246	37.01818	39.38963	25.00	−46.17
40	57.11391	41.26845	57.12060	41.25248	18.11	−57.46
41	62.95723	54.25856	62.96150	54.24154	8.97	−61.26
42	71.15298	31.86180	71.15202	31.84450	−2.93	−62.26
43	67.44516	22.48023	67.44315	22.46548	−6.68	−53.10
44	54.59975	22.84693	54.60305	22.83208	10.95	−53.43

表 1 (续)

Table 1 (continude)

NO.	$L_{\rm obs}(^\circ)$	$B_{\rm obs}(^\circ)$	$L_0(^\circ)$	$B_0(^\circ)$	$\Delta L\cos B_{\rm obs}(''')$	$\Delta B(''')$
45	31.12156	21.89173	31.12784	21.88058	20.97	−40.15
46	75.65390	−2.51429	75.64686	−2.52787	−25.33	−48.89
47	71.09204	−22.01456	71.08277	−22.02656	−30.92	−43.20

前面已经给定了 ΔL 和 ΔB 的分析表达式，由以上 ΔL 和 ΔB 的观测资料，进行最小二乘拟合，就可以得到模型的各个系数，并可得到 L 和 B 的拟合值. 观测值和拟合值之差就是残差 μ_i, 而总误差：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \mu_i^2}{n-r}} \tag{10}$$

表示望远镜经过静态模型修正后的指向精度，其中 n 为观测恒星的数量， r 为模型中待定系数的个数.

表 2 为利用表 1 的数据建立静态指向模型所确定的模型系数.

表 2 47 颗恒星资料所确定的模型系数

Table 2 Model coefficients from data of 47 stars

coefficient of L	Result($''$)	coefficient of B	Result($''$)
A_0	-27.75	B_0	−30.28
A_1	21.43	B_1	−12.08
A_2	26.65	B_2	−3.27
A_3	23.07	B_3	−23.30
A_4	14.68	B_4	14.35
A_5	22.36		
A_6	−19.11		

其中根据 (8) 式和 (9) 式，可知 A_4 与 B_4 对应， A_5 与 $-B_3$ 对应，从两个方程拟合后的结果可见符合得相当好，这也证明了模型在物理意义上的合理性.

其拟合后指向精度为：

$$\sigma_L = 10.83'', \quad \sigma_B = 4.59''.$$

可见在 L 轴上精度不能令人满意. 由于各个望远镜的制造、安装存在差异，必然造成不同的望远镜存在不同的系统误差，因此每个望远镜都有各自不同的指向模型. 这就需要分析残差的分布情况，观察其是否存在系统差，并进行回归 [4,5].

图 2 为残差分布图, 在图中我们可以看到在 L 轴的残差分布中存在一个明显的 $\sin 3L$ 信号, 而 B 轴则没有明显的信号, 因此我们在 L 轴的误差修正公式即 (8) 式中加入 $\sin 3L$ 项，即 (8) 式变为：

$$\begin{aligned}\Delta L\cos B \;=\; & A_0 + A_1\sin B + A_2\sin L\cos B + A_3\cos L\cos B + \\ & A_4\sin L\sin B + A_5\cos L\sin B + A_6\cos B + A_7\sin 3L\,. \end{aligned}\tag{11}$$

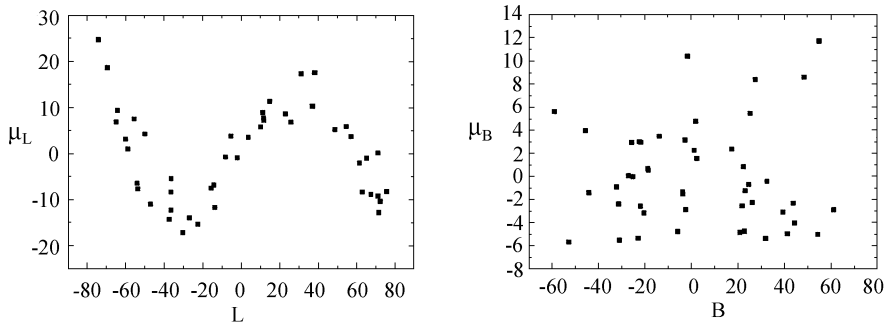

图 2　残差分布图

Fig. 2　distributing of residue

利用此式再次进行计算，得到的残差分布如图 3.

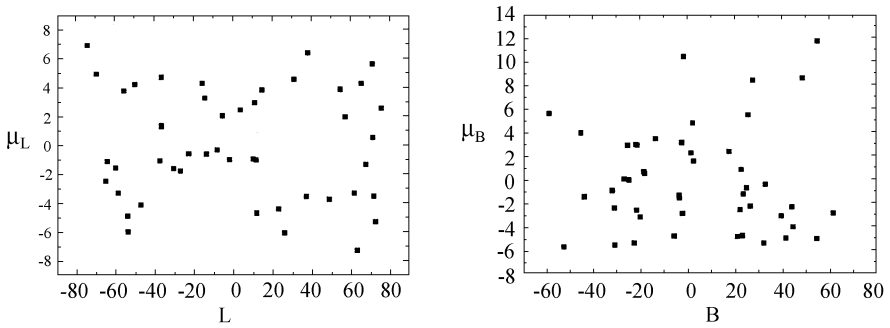

图 3　对模型改进后的残差分布图

Fig. 3　residue distributing of modified model

可见此时残差分布中已不存在明显的信号. 而此时 L 轴的模型系数变为：

$$A_0 = -12.83, \quad A_1 = 15.95, \quad A_2 = 23.33, \quad A_3 = 13.90,$$
$$A_4 = 12.54, \quad A_5 = 27.14, \quad A_6 = -27.92, \quad A_7 = 15.93\,.$$

拟合后指向精度为：

$$\sigma_L = 4.08'', \quad \sigma_B = 4.59''\,.$$

表 3 为数次观测所得到的指向精度，可以看出在经过指向模型修正了系统误差后， L 、 B 的平均指向精度分别可以达到 $4.23''$ 和 $4.75''$, 因此我们认为通过以上的处理，我们已经基本剔除了 65 cm 空间碎片望远镜本身的系统误差，大致可以满足我们在实际观测中使用的需求.

表 3　多次观测得到的指向精度

Table 3　The accuracy of pointing from many times

Stars	$\sigma_L('')$	$\sigma_B('')$
47	4.08	4.59
64	3.29	4.66
85	5.32	4.99
Average	4.23	4.75

5 结论

对于水平式望远镜而言，以传统的球谐函数作为模型，由于观测范围不含有两个极区附近的值，法方程条件比较差，因此求解球谐函数时无法得到很好的解，结果也无法达到较好的精度．我们提出的基于真实误差来源的指向模型，模型参数具有明确的物理意义，所需的观测数据不需要两个极区附近的数据．因此计算后得到的模型参数稳定，能够比较明确地反映出仪器本身的系统差．在利用模型对仪器的指向进行修正时，能够得到较好的指向精度，也证明了模型本身的合理性．

参 考 文 献

1 丁月蓉．天文测量数据的处理方法．南京：南京大学出版社， 1990
2 Zheng Xiang-ming, Wang Wu, Zhang Yun-cheng, et al. ChA&A, 2004, 28(1): 105
3 Zheng Xiang-ming, Wang Wu, Zhang Yun-cheng, et al. AcASn, 2003, 44(3): 330 (郑向明，王武，张云成，等．天文学报， 2003, 44(3): 330)
4 Zhang Xiao-xiang, Wu Lian-da. ChA&A, 2001, 25(4): 499
5 Zhang Xiao-xiang, Wu Lian-da. AcASn, 2001, 42(2): 198 (张晓祥，吴连大．天文学报， 2001, 42(2): 198)

Static Pointing Model of 65 cm Level Mounting Telescope

PING Yi-ding ZHANG Xiao-xiang Lu Chun-lin
(*Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008)

Abstract Because of the difficulty of traditional static pointing model for level mounting telescope, a new static pointing model was built for 65 cm level mounting space debris telescope in Purple Mountain Observatory. This model is based on actual sources of error, so the model coefficients have clear physical meaning and most of the system errors were rejected. The pointing accuracy is greatly improved to $4''$.

Key words Astrometry, Telescope, Pointing Model