

文章编号: 1003-501X(2011)01-0034-05

# 水平式望远镜轴系刚度分析及轴系误差的修正

吴小霞, 张景旭, 王 志

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 为了解 40 cm 水平式望远镜经纬轴系的刚度, 并解决轴系误差检测值与实际使用中轴系精度之间的矛盾, 本文采用有限元法, 对经纬轴系关键性部件进行了模态分析和重力变形分析, 分析结果表明结构刚度满足设计指标要求。利用不同经度角下经轴轴系支撑结构的重力变形分析结果, 计算出重力变形引起的经轴晃动误差, 并与检测结果进行比较, 得出两者均具有随经度角改变而正弦变化的相同规律。利用计算值对检测值进行误差补偿, 使得经轴轴系晃动误差  $PV$  值从 7.2" 降到 2.6",  $RMS$  值从 0.7" 降到 0.3", 补偿后的经轴晃动误差更符合实际使用状态下的轴系精度情况, 可作为经轴轴系性能是否满足指标要求的准确判据。

**关键词:** 水平式望远镜; 经纬轴系; 有限元法; 轴系晃动误差

中图分类号: TH743

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.01.007

## Rigidity Analysis and Error Correction for Alt-alt Telescope Shafts

WU Xiao-xia, ZHANG Jing-xu, WANG Zhi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to estimate longitude and latitude shafts rigidity and resolve conflict between shaft error test result and actual work performance of the 40 cm alt-alt telescope, vibration modes and gravity deformations at the different angles of the shaft were analyzed respectively by Finite Element Method (FEM). Frequencies and the max deformations of longitude and latitude shafts indicated that shaft rigidity satisfied the design requirement. From  $0^\circ$  to  $180^\circ$  longitude angle, longitude shaft shake error caused by gravity deformation was calculated. The shake error caused by structure deformation has the same sinusoidal variation pattern with the shaft error test result. The longitude shaft precision amendment is obtained by the compensation method that subtracting the calculated results from the test result. The shaft precision  $PV$  value is improved from 7.2" to 2.6" and the  $RMS$  value is improved from 0.7" to 0.3". The corrected shaft shake error is consistent with actual work performance state, and represents actual performance of the alt-alt telescope longitude shaft.

**Key words:** alt-alt telescope; longitude shaft and latitude shaft; Finite Element Method (FEM); shaft shake error

## 0 引 言

水平式望远镜的机械轴系经轴和纬轴是两根相互垂直的旋转轴, 且两轴线均平行于地平面。其中轴线指向南北方向的称为经轴, 指向东西方向称为纬轴<sup>[1-3]</sup>。影响水平式望远镜指向精度的轴系误差主要包括光轴与纬轴的不垂直带来的误差、望远镜置平时经轴不水平引起的误差, 经纬轴不垂直带来的误差等, 引入这些误差的因素包括望远镜制造、加工、装配以及重力作用下机械的变形等多方面原因。根据轴系的设计指标对单个零件的加工误差和配合间隙进行合理地分配设计即可保证一定的轴系精度, 而提高轴系支撑结

收稿日期: 2010-07-30; 收到修改稿日期: 2010-09-21

基金项目: 国家 863 高科技项目(2007AA703104)

作者简介: 吴小霞(1981-), 女(汉族), 江苏盐城人。助理研究员, 博士, 主要研究工作是口径望远镜的主动光学技术及光机系统的有限元分析技术。E-mail: wu-xiaoxia@sohu.com.

构刚度的目的则是为了减小重力变形带来的轴系误差，保证轴系精度。工程中还可以通过对轴系误差的修正来实现轴系精度的提高<sup>[4-6]</sup>。

为了研究 40 cm 水平式望远镜轴系的结构刚度以及重力变形对轴系误差的影响，本文利用有限元法，对望远镜经纬轴系进行模态分析和重力变形分析，计算轴系重力变形对轴系精度的影响。借助于有限元分析的结果，对该水平式望远镜的经轴轴系精度检测结果进行补偿，以实现提高轴系误差模型精度的目的。

## 1 轴系刚度有限元分析

### 1.1 有限元模型的建立

该 40 cm 水平式望远镜系统的实物图见图 1 所示，决定经纬轴系刚度的关键性支撑结构分别为外框架和内框架，其中外框架承受载荷为 800 kg，内框架则承担了光学镜筒 400 kg 的载荷。分别建立经纬轴系各自的有限元模型，如图 2 和图 3 所示，其中 X 轴为经轴方向，Z 轴为纬轴方向，Y 轴则根据右手定则确定。

模态分析结果经轴轴系所采用的轴承为一端止推，一端可以轴向移动，因此在进行有限元分析时，对经轴轴系外框架的轴端采用了一端全约束，一端具有轴线方向自由度的约束方式。而纬轴轴系采用的是一对止推轴承，因此对纬轴轴系内框架的两轴端进行了全约束。



图 1 40 cm 水平式望远镜实物图

Fig.1 Structure of the 40 cm alt-az telescope

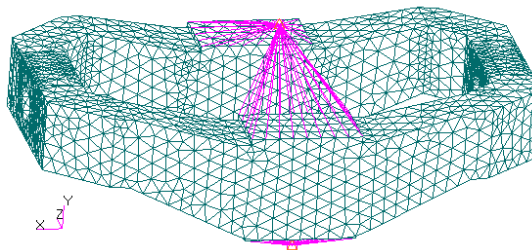


图 2 经轴轴系有限元模型

Fig.2 FE model of the longitude shaft

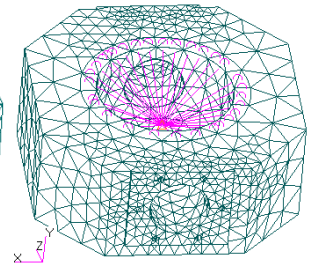


图 3 纬轴轴系有限元模型

Fig.3 FE model of the latitude shaft

### 1.2 模态分析结果

分别对经纬轴系进行模态分析，计算轴系的低阶谐振频率和模态振型。表 1 中列出了这两个框架的前三阶模态分析结果。

表 1 经纬轴系模态分析结果

Table 1 Results of shafts mode analysis

Mode	Natural frequency of longitude shaft	Longitude shaft modal	Natural frequency of latitude shaft	Latitude shaft modal
1	96.1 Hz	Shaft Free-end vibrated along longitude shaft line	693.8 Hz	Latitude shaft rocked around latitude shaft line
2	104.6 Hz	Longitude shaft rocked around longitude shaft line	712.7 Hz	Latitude shaft vibrated along Y-axis
3	111.6 Hz	Longitude shaft vibrated along Y-axis	906.9 Hz	Latitude shaft vibrated along X-axis

模态分析结果初步预示了两轴系的刚度能够满足系统的动力学要求。并且由计算结果可见经轴轴系的外框架一阶频率最低，结构刚度相对较弱，这主要是因为经轴轴系的外框架跨距较长。

### 1.3 重力变形分析

当水平式望远镜跟踪目标的经度和纬度发生改变时，其轴系关键支撑结构外框架和内框架会围绕各自的轴线进行转动，即会承受不同方向上的重力载荷。利用有限元法，借助于有限元软件可以计算出轴系支撑结构在不同指向角度时的变形情况。

当望远镜的经度角在  $0^\circ \sim 180^\circ$  之间变化时, 计算不同经度角下经轴轴系支撑结构的重力变形情况, 图 4 和图 5 分别为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  经度角下经轴轴系外框架的变形云图。

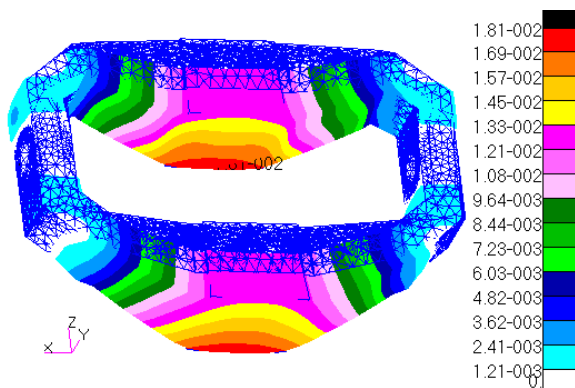


图 4 经度为  $0^\circ$  时的外框架重力变形云图(单位: mm)

Fig.4 External frame deformation of  $0^\circ$  longitude

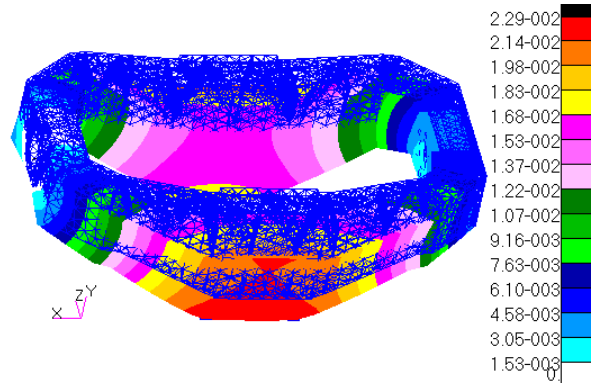


图 5 经度为  $90^\circ$  时的外框架重力变形云图(单位: mm)

Fig.5 External frame deformation of  $90^\circ$  longitude

通过变形云图可见在不同的经度角下经轴轴系的最大变形均出现在外框架的中间位置。对不同经度角下经轴轴系的变形结果进行数据处理, 拟合计算出由于经轴轴系支撑框架的重力变形引起的轴线中间位置的弯曲下沉变形量, 如表 2 中所列。同样可以计算出纬轴轴系支撑框架的重力变形引起的纬轴的弯曲变形情况, 如表 2。

表 2 不同经度下经轴的最大变形量

Table 2 Max deformation of longitude shaft at different angle

Degree of longitude/ $^\circ$	Max deformation of longitude shaft/ $\mu\text{m}$	Max deformation of latitude shaft/ $\mu\text{m}$
0	12.22	0.19
15	12.70	0.20
30	13.91	0.21
45	15.42	0.24
60	16.79	0.26
75	17.73	0.27
90	18.06	0.28
105	17.73	0.28
120	16.79	0.27
135	15.42	0.25
150	13.91	0.22
165	12.70	0.20
180	12.22	0.19

根据有限元分析结果可知, 经轴最大重力变形发生在经度角  $90^\circ$  时, 其变形量为  $18.06 \mu\text{m}$ ; 时, 纬轴最大变形出现在纬度角为  $90^\circ$  时, 变形量为  $0.28 \mu\text{m}$ 。重力变形分析结果表明经纬轴框架的最大变形量引起光学误差仍在设计指标范围内, 满足使用要求。

## 2 重力变形引起的经轴晃动误差

经轴轴系采用了一端止推, 一端可以轴向移动的球轴承支撑方式, 根据上述有限元分析可见, 不同经度角下经轴轴系的重力变形将会引起经轴的角晃动误差。而纬轴轴系采用的是一对止推轴承, 且纬轴轴系中的内框架刚度较高, 其重力变形对纬轴的晃动影响可以忽略不计。因此文中仅对重力变形引起的经轴晃动误差进行分析研究。

不同经度角外框架的重力变形引起的经轴角度晃动量为

$$\Delta = -\arctan(\delta/L) \quad (1)$$

其中： $\delta$ 为重力变形引起的经轴弯曲下沉量，见表 2 中所列； $L$  为经轴轴系两端轴承之间的跨度值，该水平式望远镜中  $L$  为 1 780 mm。根据上式即可计算出不同经度角时，重力变形引起的经轴晃动误差，计算结果见表 3 所列。拟合出重力变形引起的经轴晃动误差与经度角之间的关系曲线图，如图 6 所示。

表 3 重力变形引起的经轴误差

Table 3 Longitude shaft error caused by structure deformation

Degree of longitude/(°)	Shake error/(")	Degree of longitude/(°)	Shake error/(")
0	-1.42	105	-2.05
15	-1.47	120	-1.95
30	-1.61	135	-1.79
45	-1.79	150	-1.61
60	-1.95	165	-1.47
75	-2.05	180	-1.42
90	-2.09		

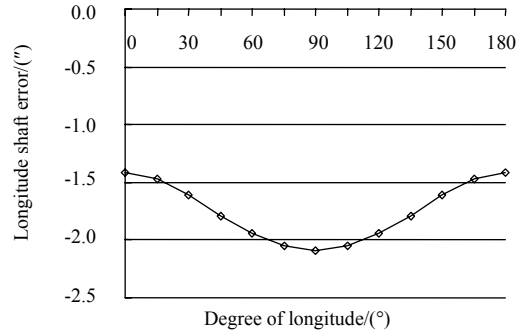


图 6 经轴轴系误差随经度角的变化曲线

Fig.6 Relation between axis error and longitude

### 3 经轴轴系误差检测结果

当经纬轴系对接安装调试完毕后，先向一个方向连续转动经轴轴系 720°，再反方向连续转动经轴轴系 720°，每隔 30°读取经轴轴系角晃动量，取正反转的平均值，并采用谐波分析方法减小测量误差后即可计算获得经轴轴系的晃动误差表。由于 40 cm 水平式望远镜经轴轴系的工作角度仅为 0°~180°，因此表 4 中仅列出了经度角 0°~180°之间的轴系误差检测数据，其轴系晃动误差  $PV$  值为 7.2"， $RMS$  值为 2.6"。绘制出经度角 0°~180°下经轴轴系晃动量的变化曲线，如图 7 所示。

表 4 经轴轴系误差检测结果

Table 4 Test data of longitude shaft error

Degree of longitude/(°)	Clockwise reading/(")		Counter clockwise reading/(")		Shake error /(")
0	13.4	13.4	13.3	13.7	3.300
30	11.0	11.4	11.6	11.5	1.516
60	8.5	8.3	8.3	8.1	-2.200
90	8.1	8.3	8.1	8.0	-3.790
120	13.0	13.0	12.6	12.4	-0.960
150	17.6	17.8	17.6	17.2	2.163
180	20.1	20.2	19.9	19.8	3.438

$PV=7.2", RMS=2.6"$

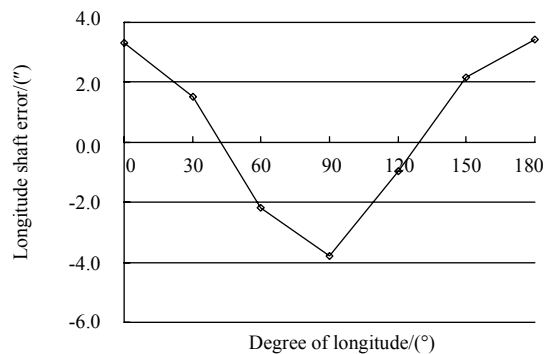


图 7 经轴轴系误差检测结果的规律曲线

Fig.7 Curve of test data for longitude shaft

### 4 经轴轴系误差的修正

通过有限元分析和实际检测发现，当水平式望远镜经度角在 0°~180°内变化时，轴系结构的重力变形引起的经轴晃动量和实际晃动量检测值之间具有相同的变化趋势。而重力变形引起的轴系晃动误差属于系统误差，因此可以借助于有限元分析结果对经轴晃动误差检测值进行相应的补偿。具体方法就是在对应的经度角位置上，用轴系晃动误差的检测值减去重力变形引起的轴系晃动量，补偿后经轴晃动误差值列于表 5 中，图 8 为修正前后的经轴轴系的误差曲线。

由补偿修正结果可见，经轴晃动误差的  $PV$  值降为 0.7"， $RMS$  值降为 0.3"，与原检测结果相比有了明显的降低，且与望远镜进行恒星观测时的实际工作性能相吻合。

表5 修正后的经轴轴系误差

Table 5 Longitude shaft error after amendment	
Degree of longitude/(°)	Shake error /(")
0	1.4
30	1.6
60	1.9
90	2.1
120	1.9
150	1.6
180	1.4

$PV=0.7''$ ,  $RMS=0.3''$

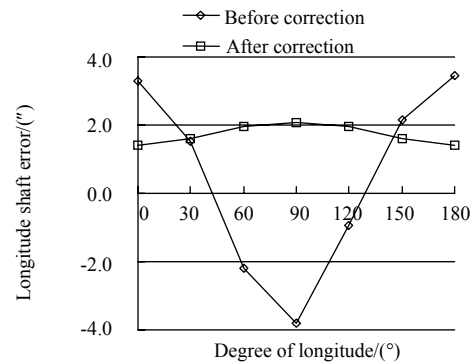


图8 经轴轴系误差检测值修正前后

Fig.8 Longitude shaft errors before and after correction

## 5 结论

采用有限元方法分析计算出水平式望远镜经纬轴的低阶模态和重力变形情况,初步验证系统刚度满足设计指标要求。同时利用有限元计算出经度角变化时,轴系结构重力变形引起的经轴晃动误差值,并与轴系误差的检测值相比较。通过有限元分析结果对轴系误差检测值的补偿修正,得出该水平式望远镜的经轴轴系误差的  $PV$  值为  $0.7''$ ,  $RMS$  值为  $0.3''$ ,修正后的轴系误差模型更符合望远镜实际工作性能情况。

### 参考文献:

- [1] 韩雪冰, 张景旭, 王志, 等. 水平式光电望远镜照准差检测方法 [J]. 光电工程, 2009, **36**(6): 63-67.  
HAN Xue-bing, ZHANG Jing-xu, WANG Zhi, *et al.* Research of alt-alt photoelectric telescope sighting error measurement [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, **36**(6): 63-67.
- [2] 张耀明, 邹丽新, 沈江. 水平式光电经纬仪主要性能的分析 [J]. 苏州大学学报: 自然科学, 2002, **18**(2): 21-24.  
ZHAO Yao-ming, ZOU Li-xin, SHEN Jiang. Main feature analysis of photoelectric theodolite of horizon type [J]. **Journal of Suzhou University: Natural Science**, 2002, **18**(2): 21-24.
- [3] 平一鼎, 张晓祥, 鲁春林. 65 cm 水平式望远镜静态指向模型 [J]. 天文学报, 2006, **47**(2): 224-230.  
PING Yi-ding, ZHANG Xiao-xiang, LU Chun-lin. Static pointing model of 65 cm level mounting telescope [J]. **ACTA Astronomica Sinica**, 2006, **47**(2): 224-230.
- [4] 赵金宇, 王德兴, 李文军, 等. 望远镜系统误差动态修正的一种新方法 [J]. 红外与激光工程, 2005, **34**(2): 244-247.  
ZHAO Jin-yu, WANG De-xing, LI Wen-jun, *et al.* New method of dynamic correction for the system errors of telescope [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2005, **34**(2): 244-247.
- [5] 赵勇志, 张景旭, 吴小霞, 等. 1 m 望远镜俯仰轴系精度检测误差的修正 [J]. 光学精密工程, 2009, **17**(10): 2401-2405.  
ZHAO Yong-zhi, ZHANG Jing-xu, WU Xiao-xia, *et al.* Modification of altitude axis errors for 1m aperture telescope [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2009, **17**(10): 2401-2405.
- [6] 高策, 乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正 [J]. 光学精密工程, 2007, **15**(6): 846-851.  
GAO Che, QIAO Yan-feng. Real-time error-correction method for photoelectrical theodolite [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15**(6): 846-851.