

## TMT 三镜系统 tilt 轴轴承方案研究

赵宏超<sup>1,2</sup>, 张景旭<sup>1</sup>, 杨 飞<sup>1</sup>

(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:** 30 m 口径望远镜(TMT)的三镜跟踪系统(M3PA)的运动性能和指向精度指标均高于已建成的各大望远镜,且工况复杂多变,给设计人员带来了巨大的挑战。三镜跟踪系统包括 Rotator 轴和 Tilt 轴两部分。重点研究了 Tilt 轴轴承布置方案以及相应分析。提出了两种轴承方案,经过分析,使用一对双列角接触转盘轴承的方案更适用于 Tilt 轴的工作需要,此时结构第一阶谐振频率可达到 15.1 Hz,满足 Tilt 轴的设计要求。选定方案后,针对所选择的轴承,使用 ANSYS 进行了仿真。仿真结果显示,所选轴承中滚动体的最大承载达到 5 000 N,最大应力大约为 2 300 MPa,承载曲线满足经典余弦分布,从而证明仿真数据可靠,模拟方法可信;另外四列滚动体上都有明显的承载,从而说明所选择的轴系能够很好地将载荷分散到两侧结构架上。分析结果表明,这种结构形式能够满足 TMT 三镜系统对刚度要求。

**关键词:** 30 m 望远镜项目; 轴承布置形式; 轴承模拟; 有限元仿真

**中图分类号:** TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0122-05

## TMT M3 system tilt axis bearing method

Zhao Hongchao<sup>1,2</sup>, Zhang Jingxu<sup>1</sup>, Yang Fei<sup>1</sup>

(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:** The tertiary mirror pointing assembly(M3PA) of the thirty meters telescope(TMT) is the largest tertiary mirror in the world. The tracking and pointing performance of M3PA is better than any other telescopes which have been built, and the working condition is even worse. So the designers face an enormous challenge. The tracking system includes the bottom rotator axes and the tilt axes. The study of this paper focused on the tilt axes. There were two bearing arrangement methods for the tilt axes. The first one used two single angular contact bearing to stand the shaft. The second used two double rows angular contact bearings. They both met the requirement when the M3PA was vertical. But the first method became invalid when the M3PA was horizontal, while the second can provide a better support about 15.1 Hz of the first modal frequency. Then some FEA were done to find out the carrying capacity of the bearings. The results show that the maximum load applied on the rollers is up to 5 000 N, while the maximum stress is up to 2 300 MPa. Otherwise, the load distribution just likes a cosine curve. So it can

收稿日期:2014-05-10; 修订日期:2014-06-12

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程专项基金

作者简介:赵宏超(1985-),男,博士生,主要从事望远镜机械设计方面的研究工作。Email:zhaohcciompi@163.com

导师简介:张景旭(1965-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事大型光电经纬仪结构设计。Email:zhangjx@ciomp.ac.cn

be found that the analysis is believable. In addition, there are evident load applied on the four rows rollers, which proves that the bearing arrangement can disperse the load effectively. It can be concluded that the selection of the bearing arrangement is a good choice for TMT tilt axes design.

**Key words:** TMT; bearing arrangement; bearing simulation; FEM

## 0 引言

30 m 望远镜(TMT)计划是由美国加州理工学院(Caltech)、加州大学系统(UC)和加拿大大学天文研究联盟联合发起的国际合作项目,目前参与的国家包括中国、加拿大、日本和印度等<sup>[1]</sup>。中国承担了三镜系统部分的设计与制造。该项目计划于夏威夷莫纳克亚峰建造一个世界领先的 30 m 巨型光学-红外观测设备,其集光面积大约为 650 m<sup>2</sup>,观测波段范围为 0.3~28 μm。其三镜为椭圆形平面镜,长轴为 3.594 m,短轴为 2.536 m。由于经 TMT 三镜反射后的光线的轴线不一定与俯仰轴轴线重合,所以,当望远镜的三镜在其他位置工作时,需要三镜系统具有跟踪和瞄准的功能。为了能够实现其跟踪瞄准的功能性要求,需要设计一个大型的 2 维转台<sup>[2]</sup>。

这个 2 维转台在 TMT 三镜系统中被称为 M3PA。M3PA 在结构形式上类似于望远镜地平式跟踪架,有两个正交的轴系:Rotator 轴和 Tilt 轴,但是 M3PA 的工况更为复杂。传统望远镜跟踪架中,方位轴的轴线始终垂直于地面,俯仰轴轴线始终水平<sup>[3]</sup>。但在 M3PA 中 rotator 轴的轴线与重力方向的夹角在观测过程随天顶角的增大而增大;同时,tilt 轴也不再水平,而与重力形成一定的夹角。文中研究重点就在于 tilt 轴系轴承的选型、布置形式的选择以及轴承的模拟及承载校核。

## 1 Tilt 轴工况分析

### 1.1 Tilt 轴运动

传统地平式望远镜中经三镜反射的光线的光轴位于俯仰轴轴线上,使得望远镜俯仰运动的过程中三镜系统不需要转动就可以维持准直。根据使用设备的不同,经过 TMT 三镜反射后的光线的轴线并不一定能够落到仰俯轴轴线上,所以伴随着 TMT 俯仰轴的旋转,三镜系统必须相应地旋转和倾斜,以保证光学成像仪器与光学系统的准直。如图 1 所示,在望远镜的天顶角从 0°到 65°的变化过程中,位于+X

Nasmyth 平台上的不同设备所对应的三镜系统的 Rotator 和 Tilt 角度。

Rotator 角度由下面的方程式得到<sup>[4]</sup>:

$$\Omega = \arctan((\cos(\xi)\cos(\text{IEA})\sin(\text{IBA}) + \sin(\xi)\sin(\text{IEA})) / (\cos(\text{IEA})\cos(\text{IBA}))) \quad (1)$$

Tilt 角度由下面的方程式得到<sup>[1]</sup>:

$$\Phi = \frac{1}{2} \arccos(-\sin(\xi)\cos(\text{IEA})\sin(\text{IBA}) + \cos(\xi)\sin(\text{IEA})) \quad (2)$$

式中: $\xi$  为望远镜俯仰轴的天顶角;IEA 为仪器俯仰角;IBA 为仪器方位角,其中后两者用来确定设备在望远镜上的位置。

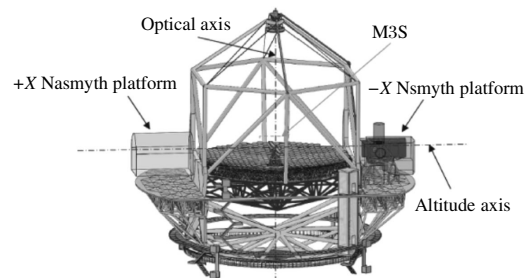


图 1 TMT 简图

Fig.1 TMT sketch map

最终,Tilt 轴的位置和方向是 TMT 方位、俯仰以及 M3PA 的 Rotator 三轴正交运动的结果。

其中 Tilt 轴与重力方向的夹角可以表示为:

$$\Gamma = \arccos(G(\mathbf{RT})) \quad (3)$$

其中: $G=[0, 0, 1]'$ ;  $T=[1, 0, 0]'$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos(\xi)\cos(\Omega) & -\cos(\xi)\sin(\Omega) & \sin(\xi) \\ \sin(\Omega) & \cos(\Omega) & 0 \\ -\sin(\xi)\cos(\Omega) & \sin(\xi)\sin(\Omega) & \cos(\xi) \end{bmatrix}$$

式中: $\Omega$  为三镜 Rotator 轴转动角度。

### 1.2 承载分析

传统地平式望远镜中,俯仰轴是经过严格配平的。但在 TMT 三镜系统中三镜椭圆镜面的短轴为 Tilt 的转动轴线,所以 Tilt 轴是一个严重偏心的结构,这种结构给设计带来了很大的困难,如图 2 所示。

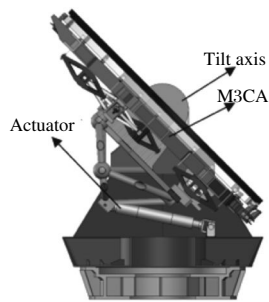


图 2 三镜系统简图

Fig.2 Model of M3S

根据前期三镜镜室(M3CA)的设计可知, M3CA部分的总质量为 4.2t<sup>[5]</sup>, 镜室托架(Cradle)重约 1.4t, 所以整个 Tilt 轴的承载约 5.6t, 且重心位于 Tilt 轴以下 200 mm 处。

使用坐标变化, 可以得到在各个工作位置 M3CA 和 Cradle 在重力总用下施加给 Tilt 轴系上的轴向力和径向力。其中, 两个力的幅值如表 1 所示。

表 1 工作位置最大载荷

Tab.1 Load of the worst work condition

Zenith angle/(°)	Max axial force/N	Max radial force/N
65	42 000	51 000

## 2 轴承样式及布置选择

世界上已建成的望远镜中俯仰轴系的支撑形式多种多样。其中主要有以下三种主要形式<sup>[4]</sup>: 轴系一端采用端面轴承和径向轴承支撑的固定端, 另一侧采用可轴向窜动的径向轴承支撑; 采用两对预紧角接触球轴承支撑, 如 TNG 望远镜等; 使用一对圆锥滚子轴承支撑, 例如 DCT 望远镜等。

根据工况分析可知, Tilt 轴系既要承受轴向力又需承受径向力, 且两者在量级上相同, 而所述的三种支撑形式都能满足这一要求。另外, 基于轴系低摩擦的设计要求, 轴承选型上选择使用球轴承。为此使用有限元方法对比了前两种轴承结构方案。

### 2.1 一端固定一端游动支撑

这种方案中, 轴系左轴头部分采用一个端面轴承和一个径向轴承支撑, 轴系右轴头部分采用一个径向轴承支撑。

在 ANSYS 中, 笔者使用 link180 单元对这种情况进行了模拟。当施加沿 -x 方向重力时, 变形云图如图 3 所示。

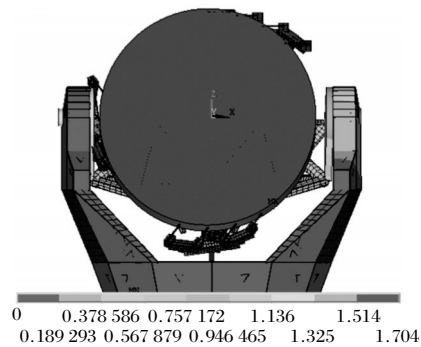


图 3 方案一的静力学分析结果

Fig.3 Result of the first plan by FEA

有限元分析结果可知, M3PA 中右侧的立柱有变形, 另外一侧基本没有变形, 并且三镜整体位移大约为 1.704 mm。这说明这种轴承形式不能将载荷有效传递到两侧结构件上, 从而存在立柱受力不均的情况, 而这种情况的发生会大大降低系统的谐振频率。

此时, 按照变形估计系统在这个广义方向上的模态有<sup>[6-7]</sup>:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta}} = 11.9 \text{ Hz} \quad (4)$$

这一计算结果远低于有限元模态分析获得的结果 15.6 Hz。主要原因是模态分析过程中忽略了轴承非线性的因素。另外, 系统一阶谐振过低会导致系统控制带宽过窄, 严重影响系统响应速度。所以这种方案是不可行的。

### 2.2 两端固定支撑

这种方案中, 笔者选择一对双排角接触球轴承作为轴系支撑。

在 ANSYS 进行模拟。当施加沿 -x 方向重力时, 变形云图如图 4 所示。

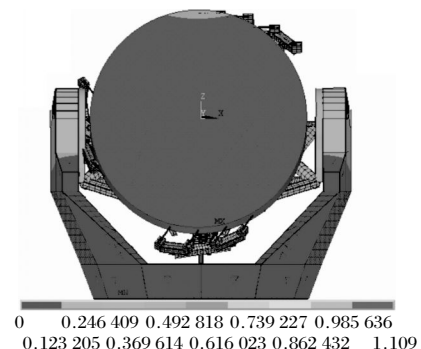


图 4 方案二的静力学分析结果

Fig.4 Result of the second plan by FEA

有限元分析结果可知,M3PA 中两侧立柱都有明显变形,且三镜在受力方向上的位移下降到 1.109 mm,从而说明这种布置形式下轴承可以有效地将力传递到左右立柱上。

此时,按照变形计算系统在这个方向的模态有:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta}} = 15.1 \text{ Hz} \quad (5)$$

可见,这种轴承布置形式可以大大增强系统的刚度,提高系统的相应能力,满足设计要求。轴承形式确定后,还需要仔细分析轴承受载情况。

### 3 轴承的有限元模拟

转盘轴承为双列角接触球轴承,钢球直径为 12.7 mm,每列钢球数量为 48 个。一对转盘轴承中共有 192 个钢球。通过对两侧轴承预紧后使用,预紧力大约为 9 000 N。

#### 3.1 钢球在有限元中的简化方法

有限元中,使用 link180 单元模拟钢球,此非线性杆单元能够模拟钢球的受力情况,即只抗压不抗拉。

根据赫兹接触理论,钢球与内外滚道接触时发生的变形区域为椭圆型区域,其中长轴和短轴的大小可以根据赫兹理论计算。如图 5 所示,曲线为钢球在 0~5 000 N 负载下的变形曲线。观察曲线可知,这一曲线很大一个区域内趋近于一条直线,为此,使用最小二乘法拟合得到一条过原点的直线来模拟钢球受载下的变形<sup>[9]</sup>,其中 ANSYS 中模拟钢球的杆单元的截面积为钢球最大截面积的 1/13。轴承在有限元模型中建模如图 6 所示。

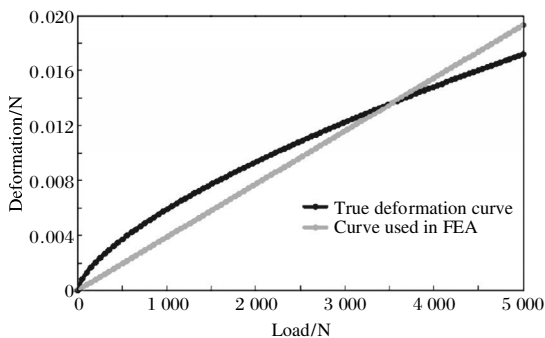


图 5 有限元模型

Fig.5 Finite element analysis model

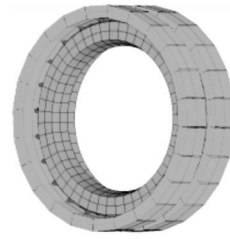


图 6 有限元模型

Fig.6 Finite element analysis model

#### 3.2 有限元分析结果

根据以上简化方法,在三镜系统有限元模型中增加轴承模拟,并在七个主要工作位置的 98 个主要工况下进行了静力学分析,其中钢球承载情况如图 7 所示。

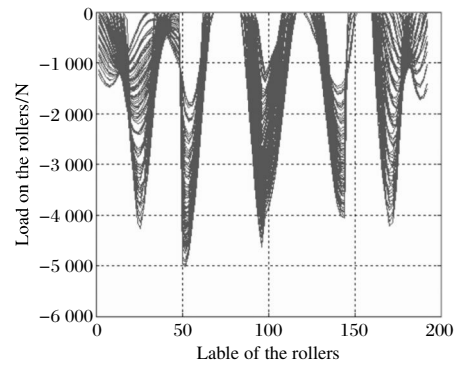


图 7 有限元分析结果

Fig.7 Results calculated by FEA

其中横坐标代表钢球的编号,纵坐标代表钢球的承载。由模拟结果可知,钢球只承载压力载荷,不承载拉力载荷;四列钢球都承担了系统的部分载荷;单列的承载曲线近似于余弦分布;最大载荷大约为 5 000 N。

根据赫兹接触应力的计算式可得,作用在轴承上的最大赫兹接触应力  $P_{\max}$  为<sup>[8-10]</sup>:

$$P_{\max} = \frac{1.5Q}{\pi ab} = 2\,300 \text{ MPa} \quad (6)$$

其中, $a$ 、 $b$  分别为根据赫兹接触理论计算得到的变形区域椭圆形边界的长短轴的长度。

根据相应的数值计算可得,钢球与滚道接触的部分最大接触应力大约为 2 300 MPa。低于轴承材料的失效强度,能够满足需要。

### 4 结论

基于 TMT 三镜系统特殊性的要求,对比几种方

案最终选择使用一对双列角接触球轴承作为 Tilt 轴轴系支撑。这种轴系支撑方式能够很好地将载荷传递到两侧的结构件上,有效提高了结构的刚度,使得系统第一阶模态频率从 11.9 Hz 提高到 15.1 Hz。

另外,根据所选择的轴承,使用有限元方法进行了仿真,仿真结果显示:三镜系统在主要的七个工况下工作时,轴承滚动体上的载荷最大能够达到 5 000 N,最大应力能够达到 2 300 MPa;另外四列滚动体上的承载说明所选择的轴系能够很好地将载荷分散到两侧结构件上,达到了设计目的。

该结论对于大口径望远镜大型轴系设计具有重要的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] TMT Group. Design Requirements Document for Tertiary Mirror System(M3S)[Z]. TMT OPT DRD. 07. 006. REL29. 2012.
- [2] Cheng J Q. Principles of Astronomical Telescope Design[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003. (in Chinese)  
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.
- [3] Sun Hang, Zhang Haibo, Cao Lihua, et al. Error compensation for primary mirror shaking of large aperture optical detection equipment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 85-91. (in Chinese)  
孙航, 张海波, 曹立华, 等. 大口径光电探测设备主镜晃动的误差补偿[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(1): 85-91.
- [4] Guo Ning, Lv Junwei, Deng Jiangsheng. Design of filter only by angle information in opto-electronic tracking system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(7): 1818-1824. (in Chinese)  
郭宁, 吕俊伟, 邓江生. 光电跟踪系统纯角度滤波器的设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(7): 1818-1824.
- [5] Shi Jinfeng, Wu Qingwen, Yang Xianwei, et al. Thermal design of vertical collimator with large aperture and long focus [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1617-1622. (in Chinese)  
石进峰, 吴清文, 杨献伟, 等. 光轴竖直大口径长焦距平行光管热设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1617-1622.
- [6] Liu Shutian, Hu Rui, Zhou Ping, et al. Topologic optimization for configuration design of web-skin-type ground structure based large-aperture space mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(7): 1803-1810. (in Chinese)  
刘书田, 胡瑞, 周平, 等. 基于筋板式基结构的大口径空间反射镜构型设计的拓扑优化方法[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(7): 1803-1810.
- [7] Wang Haiyang, Li Li, Jing Ning, et al. Design of MWIR continuous zoom optical system with large zoom range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 398-402. (in Chinese)  
王海洋, 李力, 金宁, 等. 大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 398-402.
- [8] Genberg V, Michels G. Making FEA results useful in optical analysis[C]//SPIE, 2002, 4769: 24-33.
- [9] An Qichang, Zhang Jingxu, Zhang Limin. Dynamics analysis of telescope third mirror wire support structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2115-2119. (in Chinese)  
安其昌, 张景旭, 张丽敏. 望远镜次镜钢索支撑结构动力学分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2115-2119.
- [10] Su Yanqin, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Conceptual design of rotator assembly bearing in TMT tertiary mirror system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1510-1517. (in Chinese)  
苏燕芹, 张景旭, 杨飞, 等. 30 m 望远镜的三镜 Rotator 组件轴承概念设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1510-1517.