

文章编号: 1003-501X(2011)05-0064-05

大口径望远镜 Coude 光路光机结构设计研究

张丽敏, 明 名, 杨 飞, 乔 兵

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: Coude 光路是大口径望远镜光学系统必要的组成部分, 它将主望远镜的光束进行传递, 以使其进入望远镜机下 Coude 实验室, 与子光学系统相耦合。在 Coude 光路中, 存在多块折转反射镜, 反射镜之间的相对位置关系影响着系统的成像质量。因此如何保证光学元件之间的位置关系, 成为光机结构研究的关键问题。根据系统要求分析并设计了各类型调整机构, 包括二维半运动支撑倾斜调整机构、一维燕尾形导轨平移机构和一维精密旋转机构, 机构行程大、操作便捷, 既保证光学元件之间的准确位置关系, 也便于装调和检测。整个研究方法适用于光机系统调整, 在实践中得到了应用。

关键词: Coude 光路; 成像质量; 调整机构; 装调和检测

中图分类号: TH122

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.05.012

Design for Coude Optic-mechanical Structure of Large Aperture Telescope

ZHANG Li-min, MING Ming, YANG Fei, QIAO Bing

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

Abstract: In large aperture telescope optical system, Coude path is very important though it deliver the major optical path to enter in the Coude laboratory below telescope, coupling with the sub-optical system. Coude path is composed of many deflected mirrors, and position relationship among optical elements is important for its image quality. So it's a key technique to ensure their accurate position relationships. On the basis of system requirement, a kind of tuning mechanisms is designed, including tip/tilt tuning mechanism utilizing semi-kinetic support, Dovetail-groove rail displacement mechanism and fine revolution structure. Each of them is characterized with long stroke and convenient operation. So they not only can assure the accurate position relationship, but also are suitable for adjustment and detect. The whole research technique can be a fine reference to the optic-mechanical system, and has been utilized in actual engineering.

Key words: Coude path; image quality; tuning mechanism; adjustment and detect

0 引言

一般在口径同轴反射式望远镜中, 主望远系统即主次镜的成本很高, 为了让望远镜具有多功能性, 提高主望远系统的使用效率, 在设计时使得主望远系统的焦点可以进行相应的切换, 形成多个子光路, Coude 光路就是其中之一。Coude 光路是典型的全反射光路, 它的主要作用是将主望远系统的光束传递到机下的光学实验室, 在尽可能减少能量损失的前提下, 为相应的子光学系统提供良好质量的对接光束。

整个 Coude 光路系统由多片反射镜组成, 而且各反射镜之间间隔较大, 这给结构支撑和装调带来了一定的难度。在设计 Coude 光学系统的支撑结构时, 首先必须保证在工作时光学表面的面形精度变化在设计的公差范围内; 其次保证各光学元件之间准确的位置关系, 使其误差在设计的公差范围内; 最后要充分考

收稿日期: 2010-12-29; 收到修改稿日期: 2011-02-15

基金项目: 中国科学院三期创新基金

作者简介: 张丽敏(1981-), 女(汉族), 山西朔州人。助理研究员, 博士研究生。主要研究工作是精密机械设计。E-mail: zhangtqx@163.com。

考虑装调和检测可行性和方便性^[1]。

对于这类型复杂光学系统, 机械零件和光学元件之间的简单连接很难使光路对准并满足公差要求, 即使能够满足要求, 对机械加工和装调的要求也相当苛刻。因此在满足光学设计要求的条件下, 可以使部分光学元件支撑系统增加调整机构, 对光学元件的位置进行调整, 以便于装调和有效的光路对准。

本文以某大口径望远镜光学系统为例, 首先对其 Coude 光学系统进行了介绍, 然后分析其中的各组件, 并设计了关键支撑和调整结构, 得出相应的结论。

1 Coude 光学系统

在光学系统中, 两块平面反射镜的空间相对位置关系主要有三种, 分别如图 1 所示^[2]:

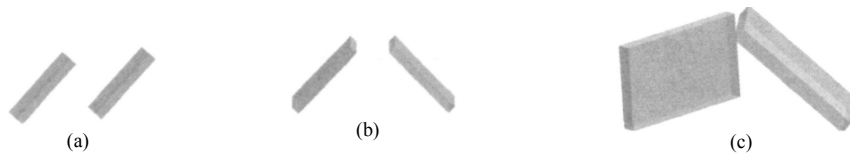


图 1 反射镜位置关系示意图

Fig.1 Sketch of position relationship between reflecting mirrors

- 1) 两平面反射镜的法线在同一平面且平行, 光线经过后方向不变, 位置平移, 见图 1(a);
- 2) 两平面反射镜的法线在同一平面且垂直, 光线经过后方向改变 180°, 位置平移, 见图 1(b);
- 3) 两平面反射镜的法线不在同一平面且空间垂直, 光线经过后方向空间改变 90°, 见图 1(c)。

在该望远镜系统中, Coude 光学系统由反射镜 M4~M9 组成, 如图 2 所示, 其中 M5 为离轴非球面反射镜, 其余元件均为平面反射镜。M4 与 M7、M8 与 M9 属于第 2)种位置关系, M7 与 M8 属于第 1)种位置关系。

离轴非球面反射镜 M5 是关键元件, 它主要承担光束中继传递, 其光学参数见表 1。其余平面反射镜承担折转光路任务。

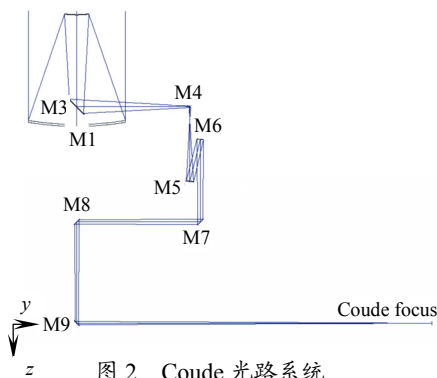


图 2 Coude 光路系统

Fig.2 Coude optical system

表 1 离轴非球面反射镜参数

Table 1 Parameters of off-axis aspheric mirror

Off-axis aspheric mirror	
No.	M5
Aperture/mm	92
Shape error (RMS)	$\lambda/30$
Eccentricity/mm	-198.68
Slope/(°)	15
Distance between M5 and first image plane/mm	767.1

各反射镜装调公差如下:

M4 与 M5 间距公差: $\pm 0.1 \text{ mm}$

M5 与光轴倾斜公差: $\pm 30''$

M5 与光轴偏心公差: $\pm 0.05 \text{ mm}$

其余各折转平面镜之间的倾斜公差为 $1'$, 间距公差为 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 。

2 Coude 光路支撑系统分析与设计

2.1 光路调整和支撑方式分析

综合考虑整个光路和望远镜结构, M4 和 M7 起承上启下的作用; M5 离轴非球面镜是满足系统要求的关键元件, 在考虑其光学位置的同时需要考虑其检测方法, 所以 M5 和 M6 组件综合考虑, 以保证其入射

光线与出射光线的平行和等高; M8 和 M9 位于转台内部, 负责光路是否与方位轴同轴。根据功能要求便可以确定各光学元件之间的调整关系。

光学元件的支撑结构除需要保证元件之间的相对位置关系之外, 也需要保证光学元件的面形不被破坏。反射镜常用的支撑有中心支撑、背部支撑和边缘支撑。本光路系统中反射镜显然不适合于中心支撑, 其支撑方案只能在背部支撑和边缘支撑中考虑。根据 3 点定面原理, 镜座设计有 3 个与压块位置对应的凸起与反射镜接触, 而且在反射镜镜面和压块之间放置柔性衬垫, 以避免反射镜的过分变形, 同时降低加工难度。

2.2 调整结构分析与选择

根据分析, 4 维调整机构既可满足 4 块 45° 倾斜平面反射镜光路对准要求, 即两维倾斜调整和在相互垂直光路方向上的两维平移。

被调整元件背部有 3 个或 4 个驱动器支撑均可以实现 2 维倾斜调整。4 个驱动器在机械结构上是超自由度的, 因此在加工和安装时精度要求比较高, 其优点是结构完全对称, 回转轴在理论上相互正交。3 个驱动器结构在一定角度范围内稳定性非常好, 还有一个优点是除了倾斜运动, 它还允许反射镜的垂直运动(活塞式运动), 缺点是调整需要经过计算。

平移机构一般由工作台滑板、直线移动导轨、传动机构和驱动组成, 需要时可以增加位移传感器。导轨有多种形式, 按摩擦方式划分有滑动摩擦导轨(如燕尾形导轨)和滚珠/滚柱导轨(如交叉滚柱导轨)两种。根据导轨的不同结构, 使用场合也不同。对于手动调整机构, 其精度与螺纹质量、有效螺距和调节旋钮的大小等相关。在本系统中调整机构只在装调时使用, 而且稳定性要求高, 所以选用精密配研的燕尾形导轨。

离轴椭球镜 M5, 还需要增加一维旋转调整机构, 要求旋转精度高、刚度大、转动平稳灵活无卡滞。填入式滚珠精密轴系可以满足上述要求, 还增加了对整个调整结构的尺寸适应性。

2.3 调整结构设计

结构设计时既要保证调整精度高、稳定性好, 也要注重调整和锁紧操作灵活。

设计要求如下:

- 导轨滑动自如, 无卡滞和明显间隙;
- 倾斜调整范围为 $\pm 2^\circ$;
- 水平和垂直方向调整范围均为 ± 5 mm;
- 回转调整范围为 $\pm 2^\circ$ 。

2.4 二维倾斜调整结构

2 维并联倾斜调整方式可分为 2 种, 如图 3 所示。2 维倾斜带来的光路平移分别与 h_0 和 h 有关, 图 3(a) 所示结构明显要小于图 3(b) 所示, 但是图 3(a) 所示结构的调整操作空间有限, 这在手动调整结构中尤为突出。图 3(b) 中, 倾斜座的变形会对反射镜的面型造成一定的影响, 但是对于小口径反射镜而言不会产生很大作用。

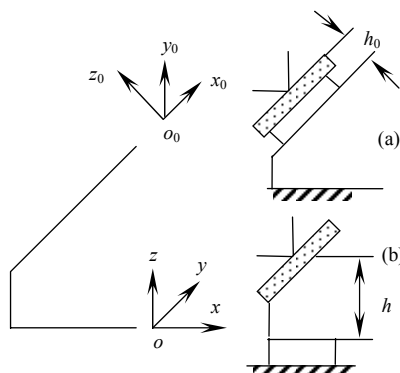


图 3 倾斜调整方式

Fig.3 Tip/tilt tune manner

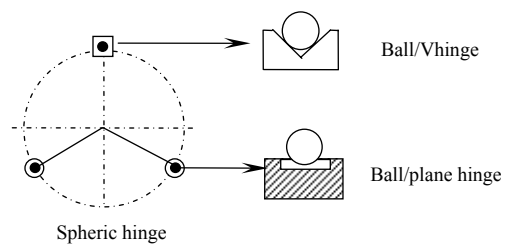


图 4 支撑原理框图

Fig.4 Sketch of support principle

反射镜的支撑是在对反射镜进行有效定位的同时卸载它的自重, 并且减小热应力对反射镜的影响以达

到减小镜面变形的目的^[3]。

在结构材料的选择上, 考虑受力及受热后结构及镜面面行的稳定性, 反射镜选用高比刚度、高稳定性的微晶玻璃, 为了避免由于材料膨胀系数不匹配对面形精度的影响, 与镜体直接接触的镜室的线膨胀系数能与反射镜的线膨胀系数一致, 则均匀的温度升降就不会带来镜面的畸变。故选择与微晶特性匹配的钢钢(4J32), 以使其反射镜力学、热性能相匹配。仅从材料的线胀系数匹配上来消除由于温度变化而造成的面形精度下降是不够的, 还要通过选用适合的结构, 进一步降低外部因素变化对反射镜面形精度的影响。

倾斜调整机构采用半运动支撑方式, 机构的自由度可以通过以下的运动准则得到:

$$M = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i$$

式中: N 为系统元件数量; g 为铰链数; f_i 为第 i 个铰链的自由度数量。

本系统中, 元件数量 $n=5$, 包括固定底座、运动平台和 3 个有相对直线运动的驱动器; 铰链数 $g=6$, 包括 1 个球铰, 1 个球/V 型接触副, 1 个球/平面接触副, 3 个直线运动副, 各自对应的自由度分别为 3、4、5、1, 所以, $M=3$ 。支撑原理框图如图 4 所示。

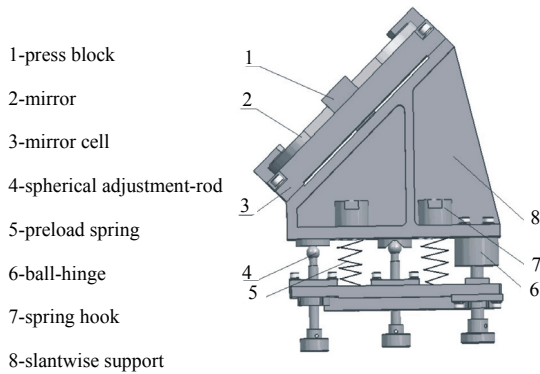


图 5 2 维倾斜调整结构装配图

Fig.5 Assembly of 2-D tip/tilt tuning mechanism

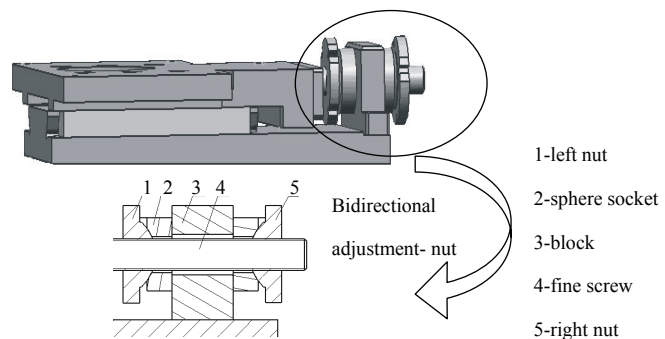


图 6 一维平移结构装配图

Fig.6 Assembly of translation mechanism

2 维倾斜调整结构装配图如图 5 所示。

在整个结构中, 球铰的精度与结构的稳定性密切相关, 所以采用特定结构代替标准的球轴承。整个球铰由上锥形槽、调整垫、下锥形槽、锁紧螺母、外壳和球杆 6 部分组成, 从而实现由传统的面接触转变为始终保持接触状态的线接触, 提高结构的稳定性。

2.4.1 一维平移调整结构

使用平移调整结构主要有 2 个原因: 一是弥补非对称中心倾斜带来的光路偏移, 二是方便整个光学系统的调整。为了使平移机构滑动平滑, 除对导轨要求精密配研外, 还需要设置环节使驱动丝杠和调整组件之间存在的微量角度和位置偏差不会对结构的性能造成影响。燕尾形导轨副由于其零件的尺寸误差、形状误差和配合间隙等因素的影响致使运动件不能沿理想运动方向移动而出现位置误差, 误差详细分析与计算见文献[4]。

单个平移结构 3 维结构图如图 6 所示。此处采用手动调整, 达到指定位置后锁紧前后两调整螺母。双向调整螺母采用球面接触形式, 由于球铰的方向原理, 从而允许驱动丝杠和调整组件之间存在微量的角度和位置偏差。这样即可以保证调整精度, 同时也降低了加工要求。

2.4.2 一维旋转调整结构

回转台的技术指标包括以下几项: 角度范围、稳定精度、动态特性和重量等。轴系精度的高低决定转台系统的精度。

由于离轴椭球镜 M5 旋转机构具有旋转精度高、工作载荷小和转速低的特点, 所以选择填入式滚珠精密轴系, 其置

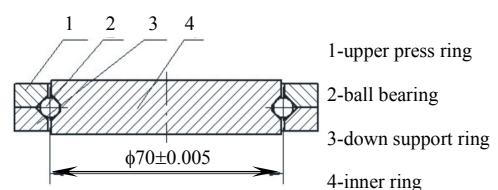


图 7 精密回转轴系

Fig.7 Fine rotating shaft

中精度与方向精度主要与间隙、滚珠直径偏差有关。这种轴系具有自动定心的作用，其轴的回转中心位于滚珠和内外锥面接触点法线的交点上^[5]。当滚珠直径偏差为 Δd 时，则轴的中心线偏差范围 $\Delta = \sqrt{2}\Delta d$ ，所以钢球选择G3(0)级(球批直径变动量 $0.13\ \mu\text{m}$)。回转半径为 r 时，轴的晃动量为 $\theta = \arctan(\Delta/r)$ 。精密回转轴系二维结构图见图7。

3 分析优化

4块反射镜均需要 45° 倾斜座，作为反射镜的支撑基础，要求刚度高，因此需要优化设计。后3块反射镜尺寸相同，而且相对较大，所以只对此反射镜的倾斜座模态进行优化分析。通过分析，确定倾斜底板厚度为6 mm，水平底板厚度为7 mm，加强筋厚度为5.2 mm。其一阶谐振为741 Hz，模态云图如图8所示。

在提高单件刚度的同时，保证元件之间的连接刚度才能提高系统的稳定性。图9(a)为M5与M6组件装配时的连接状态，通过图9(b)将两个组件连接，因此需要结合使用，加工和工艺对两个连接件进行分析优化。通过对底板厚、筋厚、筋分布间隔和分布方式的优化，使整个结构的变形优于 $2\ \mu\text{m}$ 。

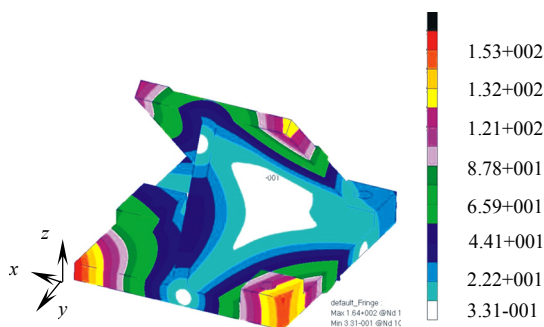
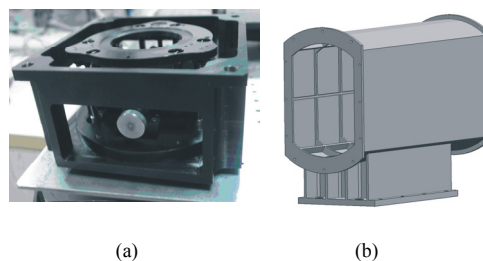


图8 45° 底座振型云图

Fig.8 Vibration model of 45° support



(a) (b)

图9 优化后的连接件

Fig.9 Optimized connecting mechanism

4 结论

文中对大口径望远镜 Coude 光路的光机系统进行了研究，根据要求详细分析并设计了各类调整机构。多维调整机构满足设计要求，精度高，在装调和使用方面均具有突出的便捷性，整个设计方法可作为同类产品的设计参考。

参考文献:

- [1] 周海宪, 程云芳. 光机系统设计: 3版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 21-27.
ZHOU Hai-xian, CHEN Yun-fang. **Opto-Mechanical Systems Design: 3rd ed** [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 21-27.
- [2] 史亚莉, 高云国, 邓伟杰. 反射光路的计算机辅助装调模型 [J]. 激光与红外, 2009, **39**(4): 427-430.
SHI Ya-li, GAO Yun-guo, DENG Wei-jie. Model for computer-aided alignment of reflective optical system [J]. **Laser & Infrad**, 2009, **39**(4): 427-430.
- [3] 付亮亮, 何欣, 廉凤慧. 小型反射镜支撑方案的设计与分析 [J]. 光学技术, 2008, **34**(4): 532-534.
FU Liang-liang, HE Xin, LIAN Feng-hui. Design and analysis of minitype reflected mirror supporting structure project [J]. **OPTICAL TECHNIQUE**, 2008, **34**(4): 532-534.
- [4] 盛鸿亮. 精密机构与结构设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 131-134.
SHENG Hong-liang. **Design of Fine Mechanism and Structure** [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993: 131-134.
- [5] 庞振基, 黄其圣. 精密机械设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 304-306.
PANG Zheng-ji, HUANG Qi-sheng. **Precision mechanics design** [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 304-306.