

doi: 10.3788/gzxb20124107.0762

地平式望远镜消旋 K 镜的设计

王志臣, 赵勇志, 周超

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:地平式望远镜在进行天体目标跟踪观测时会产生像旋, 即视场中的星体会围绕视轴中心旋转, 给实时目标识别和基于多帧积累的图像处理算法带来了诸多不便. 本文针对地平式望远镜的 Coude 光路, 设计了一种通光口径较大, 由三面平面反射镜组成的 K 镜消旋机构来消除像旋. 消旋 K 镜由三面反射镜组成, 通光口径为 42 mm, 第一面反射镜与第三面反射镜的夹角选择为 120° , 使 K 镜通光口径较大, 能在全光谱波段范围内使用. 入射光线绕光轴转动一定的角度, K 镜相应的转动入射光线转角的一半, 则出射光线不产生旋转. 第一面反射镜和第三面反射镜由两面平面镜固定在金属三角架上组成, 替代由三棱体磨制的反射镜面, 利用自准直平行光管和高准确度转台装配各反射镜, 使 K 镜光轴和回转轴同轴, 并采用直流量矩电机直接驱动, 使系统具有较快的响应速度. 测角元件采用 Renishaw 圆光栅, 细分后的角分辨率为 $0.072''$.

关键词:地平式望远镜; 视场旋转; 消旋; K 镜

中图分类号: TH744.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)07-0762-4

0 引言

消旋的方法主要有三种^[1]: 电子消旋、物理消旋和光学消旋. 电子消旋实际是一个图像处理过程, 把实时采来的每一帧图像的每一个像素按要求的消旋角进行旋转处理, 它的主要缺点是增加图像的处理时间; 降低了一定量的图像准确度; 有效显示的视场要比实际视场小, 否则旋转时画面将出现空白^[1-2]. 物理消旋是直接驱动成像器件 (CCD) 按要求的旋转角度绕光轴转动, 从而旋正图像, 它适用于成像器件较小的系统^[3], 当成像器件较大时, 不易实现. 光学消旋是在系统光路中, 在成像器件前放置一消旋器件且按要求的消旋角转动, 从而产生出射光线的转动, 以抵消图像的旋转. 光学消旋具有“非接触”、“实时”、“全场”的特点.

对于国外的地平式望远镜而言, K 镜是较为常用的消旋方式之一, 美国威尔逊山天文台胡克 100 英寸望远镜在 Coude 焦点前就安装有 K 镜消旋装置^[4]. K 镜消旋机构在我国卫星领域得到成功应用, 海洋一号卫星上搭载的水色扫描仪和风云三号 (FY-3) 气象卫星上搭载的光谱成像仪均采用 K 镜机构消除像旋^[5].

本文针对某地平式望远镜的 Coude 光路, 设计

了一种通光口径较大, 由三面平面反射镜组成的 K 镜消旋机构.

1 地平式望远镜的像旋

随着控制技术的发展, 考虑到望远镜的制造成本和跟踪架的受力状态, 现代大口径望远镜几乎无一例外的都采用了地平式结构^[6-8]. 地平式望远镜不同于赤道式望远镜, 赤道式望远镜的极轴与地球回转轴平行, 在跟踪观测天体目标时, 它以周日运动方向和速度绕极轴匀速转动, 视场中星体的位置没有相对转动^[9]. 地平式望远镜的方位轴和俯仰轴均不与地球回转轴平行, 在跟踪天体目标时, 两轴必须协调联动, 视场中星体位置产生相对转动, 即像旋, 这一变化通常用星位角 p 来表示, 星位角的位置和变化速度由式 (1) 和式 (2) 表达^[10].

$$\tan p = \frac{\sin t}{\tan \phi \cos \delta - \sin \delta \cos t} \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\cos \phi \cos A}{\sin Z} \quad (2)$$

式中 A 和 Z 分别表示天体的方位角和天顶距, 其中方位角 A 以正北为零点, 向东为正, 向西为负, 天顶距 Z 以天顶为零点算起, 其范围是 $0^\circ \sim 90^\circ$, ϕ 为望远镜所在地的地理纬度, δ 和 t 分别为被观测目标的赤纬和时角.

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (No. 2009AA8080603) 资助

第一作者: 王志臣 (1980-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为大口径望远镜结构设计的研究. Email: zewang911@163.com

收稿日期: 2011-12-13; **修回日期:** 2012-02-15

图 1 为某大口径地平式望远镜的 Coude 光路, 由于在跟踪过程中, 俯仰轴的运动使 M_3 与 M_4 产生了相对转动, 方位轴的运动使 M_8 与 M_9 产生了相对转动, 视场中的图像也将会相应的产生旋转. 定义望远镜入瞳处坐标系为 xyz , z 轴与光轴重合, x 轴在水平方向, y 轴由右手法则确定, 迎着光线观察坐标为右旋坐标. 由反射定律可知, 在偶数个反射镜面上转动的光线, 出射光与入射光等量同向转动, 在奇数个反射镜面上转动的光线, 出射光与入射光等量反向转动. 从图 1 可知, 当望远镜俯仰轴运动使 M_3 与 M_4 产生相对转动时, M_9 出射光线与 M_4 入射光等量同向转动, 当望远镜方位轴运动使 M_8 与 M_9 产生相对转动时, M_9 出射光线与 M_9 入射光线等量反向转动.

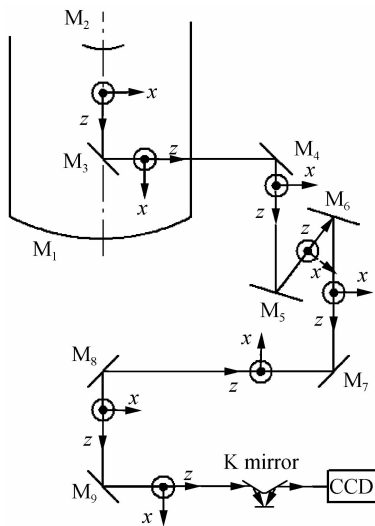


图 1 Coude 光路
Fig. 1 Coude optical path

讨论可知, 地平式望远镜在跟踪观测时会产生像旋现象, 这给实时目标识别和基于多帧积累的图像处理算法带来了诸多不便, 为了获得稳定的, 质量优良的图像, 本文采用 K 镜进行图像的消旋处理.

2 K 镜消旋原理

光学消旋可分为折射式和反射式两种^[10-11]. 折射式是采用一只道威棱镜(图 2), 道威棱镜的折射作用会引起系统光学效率的下降, 棱镜的色散作用也会影响系统的成像质量, 而且由于光学材料的限制, 只能用于可见光到近红外波段, 出于以上原因的考虑, 实际应用中很少采用该方法. 反射式是由三面反射镜组成, 避免了棱镜的折射作用而带来的问题. 如图 3 所示, 因其三面反射镜呈“K”子形, 所以称之为 K 镜, K 镜是采用反射的方式替代了道威棱镜的折射作用, 所以能在全光谱波段范围内使用.

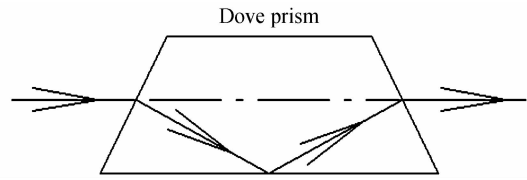


图 2 道威棱镜光路
Fig. 2 Optical path of Dove prism

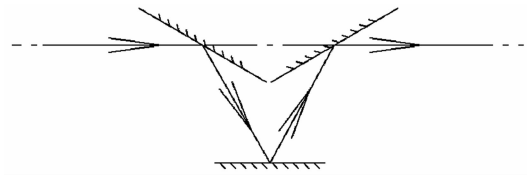


图 3 K 镜光路
Fig. 3 Optical path of K mirror

图 4 为平面镜反射原理图, 矢量 A 为入射光线, 矢量 A' 为反射光线, 单位矢量 N 为平面镜法线方向, 由 Δobc 可得出反射矢量 A' 的表达式为^[5]

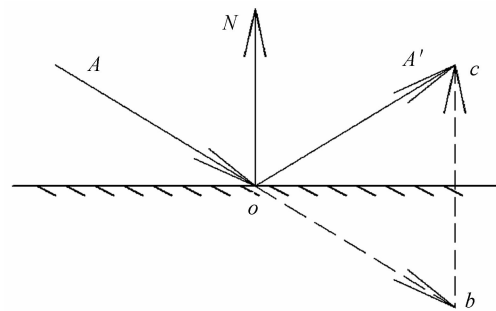


图 4 平面镜反射原理
Fig. 4 Principle of plane reflecting mirror

$$A' = A - 2 \cdot N \cdot (A \cdot N) \quad (3)$$

设矢量 $A = (A_x, A_y, A_z)$, $A' = (A'_x, A'_y, A'_z)$, $N = (N_x, N_y, N_z)$, 代入式(3)将反射矢量表达式表示为线性变换

$$A' = R \cdot A \quad (4)$$

式中

$$R = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

R 即为平面镜的反射作用矩阵.

K 镜由三面平面反射镜组成, 如图 5 所示建立坐标系, x 轴与光轴重合, z 轴垂直向上, y 轴由右手法则确定, R_1, R_2, R_3 分别为三面反射镜的反射作用矩阵, 则 K 镜的作用矩阵为

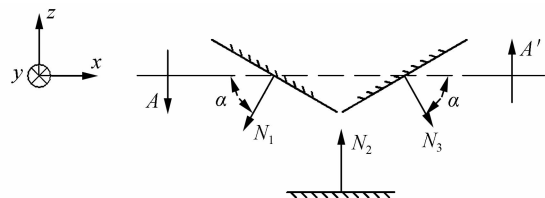


图 5 K 镜中的坐标系
Fig. 5 The coordinate in K mirror

$$R_k = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \tag{6}$$

三面反射镜的法线向量 N_1, N_2, N_3 分别为

$$N_1 = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \\ 0 \\ -\sin \alpha \end{bmatrix}, N_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, N_3 = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ 0 \\ -\sin \alpha \end{bmatrix} \tag{7}$$

将 N_1, N_2, N_3 代入式(5)中,再代入式(6)中,求得 K 镜的作用矩阵

$$R_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

在 K 镜消旋装置中如果入射向量 A 具有转角 θ , K 镜相应的转动 $\theta/2$, 则出射向量 A' 可表示为

$$A' = S^{-1} R_k S A \tag{9}$$

式中 S^{-1}, S 为 K 镜的坐标变换矩阵,且

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \frac{\theta}{2} & \sin \frac{\theta}{2} \\ 0 & -\sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \theta \\ -\cos \theta \end{bmatrix} \tag{10}$$

将 S, S^{-1}, R_k, A 代入式(9)中得出 $A' = [0 \ 0 \ 1]^T$, 即出射向量不产生任何旋转.

3 K 镜的设计

望远镜观测相机的像素数为 $1\ 024 \times 1\ 024$, 一般情况下,像旋小于像素的 $1/10$ 可以满足大多数的实验观测要求^[4], 则 K 镜的旋转分辨率要小于

$$\alpha = \arctan \frac{1}{512} \times 3600 \times \frac{1}{10} = 40.29'' \tag{11}$$

K 镜中反射镜 1 和反射镜 3 的夹角直接影响 K 镜的轴向长度和旋转半径,而且二者是相互制约的. 为了使 K 镜的轴向长度和旋转半径都处于一个合理的范围内,不至于使 K 镜太长或是太粗,经过计算比较,反射镜 1 与反射镜 3 的夹角选择为 120° .

图 6 为 K 镜的三维模型图,按照 K 镜在 Coude 光路中的摆放位置要求, K 镜的通光口径设计为 42 mm, 一对高精度角接触球轴承面对面配置, 为了使 K 镜具有较快的动态响应特性, K 镜采用了直

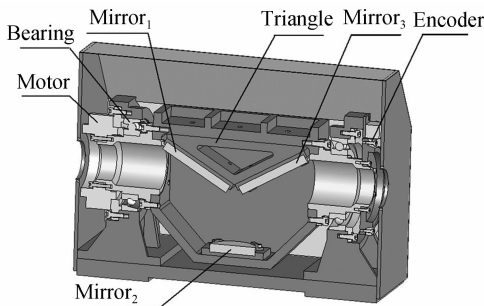


图 6 镜三维模型
Fig. 6 Model of K mirror

流力矩电机直接驱动,测角元件采用 Ranishaw 圆光栅,1000 细分后的角分辨率为 $0.072''$.

由于 K 镜通光口径较大,采用三棱体磨制反射镜面 1 和反射镜面 3 显然是不合适的,替代的方法是将两面平面反射镜固定在三角架上形成三角组件,通过精确的装调使反射镜面 1 和反射镜面 3 达到系统要求. 图 7 为三角组件变形云图,最大变形为 3.6 nm.

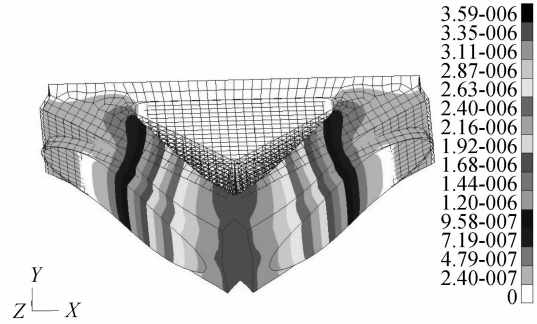


图 7 三角组件变形云
Fig. 7 Deformation of triangle assembly

K 镜装调的难点在于三轴合一,即 K 镜光轴与转动回转轴重合并且与整个系统的光轴重合. 三轴合一的重合度将直接影响整个系统的消旋结果以及视场配准度,其中 K 镜光轴与 K 镜回转轴的重合是最为困难的,为此将反射镜 1、反射镜 3 和三角架设计成单独的三角组件,利用高精度单轴转台和 $0.2''$ 自准直平行光管调整反射镜 1 和反射镜 3 同时垂直于三角架侧面基准面,这样反射镜 1 与反射镜 3 的相互位置就确定了. 利用半反半透棱镜和 $0.2''$ 自准直平行光管调整反射镜 2 与 K 镜回转轴平行,然后装配三角组件,利用平面反射镜和 $0.2''$ 自准直平行光管,只需单独调整三角组件的位置即可实现 K 镜光轴与 K 镜回转轴的重合,三角组件的调整包含 4 个方向,绕 3 个轴的转动和 z 方向移动. 装配完成后,将 K 镜置于系统光路中,通过 4 维调整,绕 y, z 轴的转动和沿 y, z 轴的移动,即可实现 K 镜回转轴与整个系统的光轴重合.

4 结论

本文以某地平式望远镜为例介绍了地平式望远镜在观测时产生像旋的原因,对三种消旋方法的优缺点进行了比较,最后采用反射式光学消旋的方法. K 镜由三面反射镜组成,避免了棱镜的折射作用而带来的一系列问题,可在全光谱波段范围内使用,利用矢量矩阵对 K 镜的消旋原理进行了详细的解释, K 镜以入射矢量 $1/2$ 的转速转动,出射矢量不会产生像旋. 本文设计了通光口径为 42 mm 的 K 镜,三面反射镜均由平面反射镜制成,拟通过精确的装调

以使 K 镜到达使用要求.

参考文献

- [1] ZENG xiang-ping, YANG Tao. Electronic system for real-time canceling image rotations [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(10): 27-30.
曾祥萍, 杨涛. 实时图像的电子消旋系统[J]. *光电工程*, 2005, **32**(10): 27-30.
- [2] JU Qing-hua, XIONG Yao-heng. Study on field of rotation of 1.2m alt-az telescope and elimination of image-rotation [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008, **5**(3): 259-263.
鞠青华, 熊耀恒. 1.2m 地平式望远镜视场旋转研究与消旋 [J]. *天文研究与技术*, 2008, **5**(3): 259-263.
- [3] WANG Ting, LI Xiao-peng, JIN Jin, *et al.* Concealing image rotation control system of CCD camera based on internal model control [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2004, **22**(6): 598-602.
王霆, 李小鹏, 金晋, 等. 基于内模控制的 CCD 相机消旋控制器 [J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2004, **22**(6): 598-602.
- [4] SCOTT W T. UnISIS field de-rotator [EB/OL]. (2000-10-23) [2011-12-10]. <http://www.ee.nmt.edu/~teare/fielddr.htm>.
- [5] GUAN Min, GUO Qiang. Offsetting image rotation system in FY-3 MERSI's geolocation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, **9**(4): 420-427.
关敏, 郭强. 光学像消旋系统在 FY-3 MERSI 图像定位中的应用 [J]. *应用气象学报*, 2008, **9**(4): 420-427.
- [6] GIAMPIETRO M. Industrial contribution in design, manufacturing, and erection of large ground-based telescopes [C]. *SPIE*, 2003, **4837**: 189-197.
- [7] PIERRE Y B. The design and construction of large optical telescopes [M]. New York: Springer, 2003: 233-236.
- [8] HUI Bin, LI Jing-zhen, PEI Yun-tian, *et al.* Integrated analysis of optics and mechanics in larger aperture catadioptric optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1117-1120.
惠彬, 李景镇, 裴云天, 等. 大口径折反射式光学系统的光机结合分析 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 1117-1120.
- [9] WANG Zhi-chen, WANG Zhi, ZHAO Yong-zhi. Analysis of pointing precision for equatorial telescope [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, **34**(1): 9-11.
王志臣, 王志, 赵勇志. 赤道式望远镜指向准确度分析 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2011, **34**(1): 9-11.
- [10] 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: 95-96.
- [11] RUAN Ping. Design of image-rotation eliminated structure and accuracy analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(2): 190-192.
阮萍. 一种消像旋传动机构的设计与准确度分析 [J]. *光子学报*, 2000, **29**(2): 190-192.

Design of K Mirror for Alt-az Telescope

WANG Zhi-chen, ZHAO Yong-zhi, ZHOU Chao

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

Abstract: Stars in the image field are rotating around image center when alt-az telescope tracks celestial targets, which increases difficulty to real time target identification and image processing based on multi-frame images. The K mirror with large aperture is designed to compensate image rotation for the Coude optical path of alt-az telescope in the paper. K mirror is composed of three reflecting mirrors, and its aperture is 42 mm. The angle between reflecting mirror 1 and reflecting mirror 3 is 120 degrees, and K mirror can be used in all spectral ranges. If incoming vector rotates a certain angle, and K mirror rotates half the angle that incoming vector rotated, then output vector does not rotate any angle. The reflecting mirror 1 and reflecting mirror 3 are made of plane mirrors and fixed on a metal triangle, substituting reflector which is made of triangular prism. Every reflecting mirror is assembled by using photoelectric auto-collimator and fine rotating platform, so it can be sure that the light axis of K mirror and the rotating axis of K mirror are in one line. The K mirror is directly driven by DC torque motor for the reason of fast response speed, and Renishaw angle encoder which angle resolution can be reach 0.072 arcsec by interpolation is adopted.

Key words: Alt-az telescope; Image field rotation; De-rotation; K mirror