

文章编号: 1002-1582(2020)01-0027-06

大型望远镜消旋 K 镜准直技术研究

张岩*, 陈宝刚, 王亮

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000)

摘 要: 针对 2m 地平式望远镜像方视场旋转问题设计了消旋 K 镜装置。根据 K 镜系统的几何光学传递特性, 推导 K 镜消旋数学矩阵模型; 利用光线追迹方法, 拟合了望远镜入瞳坐标与 Coude 焦点坐标的转换关系, 分析入射光经过 Coude 光路后的视场旋转与望远镜方位轴、俯仰轴旋转的换算规律, 从而计算得出望远镜消旋 K 镜的初始零位及旋转规则; 针对 K 镜的准直性问题, 通过对其旋转过程 K 轴与主光路偏离误差周期性变化特性的分析, 设计了基于帕斯卡窝线理论的 K 镜准直装调策略, 将复杂的准直装调问题转化为数学方程参数修正问题, 并建立 K 镜准直精度与帕斯卡窝线方程中关键参数的计算模型; 开展了 K 镜准直装调实验, 在准直装调过程中反复修正模型中关键参数, 使误差曲线不断趋近最优值。实验结果验证了本文所做研究的有效性及其正确性。

关 键 词: 几何光学; 地平式望远镜; 消旋 K 镜; Coude 光路; 帕斯卡窝线

中图分类号: TH743 文献标识码: A

DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2020.01.005

Alignment technology of K mirror in large aperture telescope

ZHANG Yan*, CHEN Baogang, WANG Liang

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

Abstract: Aiming at the image field rotation of 2m Alt-az telescope, the K mirror is designed. First, according to optical transfer characteristic of K mirror system, the mathematical matrix model is calculated. The second, based on the method of ray tracing, the transformation relation that between incident light coordinate and Coude focus coordinate is fitted. The image field rotation of incident light which through the light path of Coude is analyzed, and the conversion regularity of the image field rotation involving the azimuth axis and pitching axis of telescope is deduced, thus the initial zero and rotation rules of K mirror are obtained. Then, in allusion to the alignment accuracy of K mirror, through the analysis of the periodic variation characteristics of alignment error in the rotation period of K mirror, the alignment adjustment strategy of K mirror is designed basing on the theory of Pascal Spiral, the complex problem of alignment adjustable is transformed into the parameter correction of mathematical equations, and the calculation model of the alignment accuracy and the key parameters in Pascal Spiral equation is established. Finally, the alignment adjustable experiment is carried out, the key parameters in the model are modified repeatedly during the experiment, the alignment error curve keeps getting closer and closer to the optimal value. The correctness and effectiveness of the research is verified from the experimental results.

Key words: geometrical optics; Alt-az telescope; K mirror; Coude path; pascal spiral

收稿日期: 2019-10-08; 收到修改稿日期: 2019-12-03

基金项目: 吉林省科技发展计划优秀青年人才基金项目(20180520076JH)

作者简介: 张岩(1988—), 男, 助理研究员, 硕士, 从事地基望远镜光机结构的研究。

* 通讯作者: zhangfirstyan@126.com

0 引言

随着人们对天体目标的不断探索,望远镜的功能指标要求越来越高,大口径望远镜由于对空间目标的分辨能力具有优势,因此其是科学界研究的主要方向^[1-3]。大口径望远镜系统一般成像光程较长,主光路需要经过 Coude 系统多块反射镜的折转后成像。在望远镜跟踪天体目标过程中,由于俯仰、方位轴的转动会导致主光路在 Coude 各反射镜上发生多次旋转,从而导致望远镜焦面产生像旋。为此,需要在望远镜主光路中引入消旋装置, LBT、Hooker、JCMT 等大口径望远镜均采用 K 镜消旋方式,如图 1 所示。

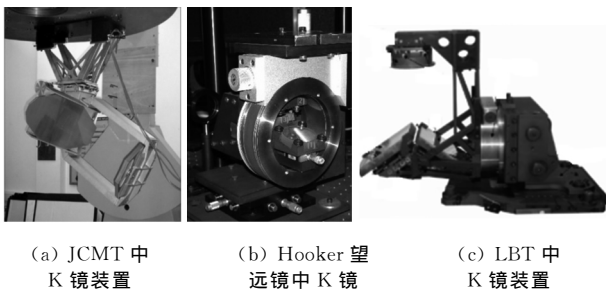


图 1 大口径望远镜中的消旋 K 镜装置

国内外相关专家及学者对望远镜消旋问题开展了许多研究^[4-6]。中国科学院云南天文台研究人员曾根据光线追迹和矩阵光学的方法分析了望远镜像方视场旋转,并将地平式望远镜由地球自转引起的物方视场旋转进行了理论推导,这些研究成果为修正像旋提供了理论依据^[7];中国科学院国家天文台研究人员分析了 K 镜的消旋原理及条件,并利用 ZEMAX 及 Matlab 对 K 镜的光学设计及误差补偿进行深入研究^[8];中科院长春光学精密机械与物理研究所对消旋 K 镜支撑结构开展研究,对其支撑点位置进行优化,保证 K 镜内部光学元件的面形精度^[9];国外方面, A. Brunelli^[10] 等对 K 镜消旋系统反射镜支撑及调整结构进行了详细的研究; 4m 望远镜项目“4m DAG telescope”研究团队对望远镜的像旋问题也开展研究,分别对消旋 K 镜的光机结构以及驱动环节进行了设计,并进行了仿真分析^[11]。此外, E-ELT、SONG Telescope 等大望远镜研究团队对消像旋问题开展了一定的研究^[12,13]。

本文在充分整理和总结国内外相关文献研究的基础上,针对 2m 地平式望远镜像方视场旋转问题设计了消旋 K 镜装置,对消旋 K 镜作用矩阵模型、初始零位及旋转规则、准直精度等问题展开深入研究,并进行了 K 镜准直装调实验,以验证研究成果的有效性及其正确性。

1 K 镜光学消旋数学模型

首先根据光学矩阵传递的原理建立 K 镜消旋的理论模型,设 K 镜入射光矢量为 A , 出射光矢量为 A' , 光线通过 K 镜依次在 K1、K2、K3 反射镜上发生折转,各反射镜的法线向量单位矩阵分别为 N_{K1} 、 N_{K2} 、 N_{K3} ,各反射镜作用矩阵为 R_{K1} 、 R_{K2} 、 R_{K3} ,反射镜作用矩阵与反射镜法线单位矩阵的关系为

$$R_K = I - 2N_K N_K^T \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} N_{K1} = [-\cos\alpha & 0 & -\sin\alpha] \\ N_{K2} = [\cos\beta & 0 & \sin\beta] \\ N_{K3} = [-\cos\gamma & 0 & \sin\gamma] \end{cases} \quad (2)$$

则 K 镜出射光与入射光矢量矩阵具有如下关系

$$A' = R_{K3} R_{K2} R_{K1} A \quad (3)$$

若入射光矢量 A 沿光轴方向旋转角度 θ , K 镜相应地沿光轴旋转 $\theta/2$, 则入射光 A 为

$$A = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [A_x \ A_y \ A_z] \quad (4)$$

K 镜中, K1、K2、K3 反射镜作用矩阵则相应地变为

$$\begin{cases} N_{K1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) & 0 \\ \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos\alpha \\ 0 \\ -\sin\alpha \end{bmatrix} \\ N_{K2} = \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) & 0 \\ \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta \\ 0 \\ \sin\beta \end{bmatrix} \\ N_{K3} = \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) & 0 \\ \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos\gamma \\ 0 \\ \sin\gamma \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

K 镜系统内部光学元件的位置关系一般满足一下条件

$$\alpha = \gamma, \beta = 0 \quad (6)$$

将式(1)、(2)、(5)带入式(3)中,则可推导出射光矢量 A' 为

$$A' = R_{K3} R_{K2} R_{K1} A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

即入射光经过 K 镜后在 x 向发生镜像,但没有发生旋转。

在 K 镜安装及准直装调的过程中,由于机械结构的加工误差以及准直误差,不能严格保证式(6)所

定义的各反射镜的位置关系。若 K 镜各反射镜偏离理想位置,如图 2 所示,推导各反射镜位置关系。

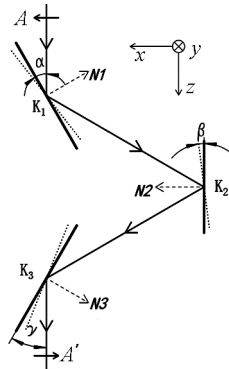


图 2 K 镜光路图

由式(7)可知,K 镜系统作用矩阵应该满足以下关系

$$R_{K3}R_{K2}R_{K1} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式(1)、(2)代入式(8)中,则

$$\begin{bmatrix} 1 - 2\cos^2\gamma & & \\ & 1 & \\ 1 - 2\sin^2\gamma & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - 2\cos^2\beta & & \\ & 1 & \\ 1 - 2\sin^2\beta & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - 2\cos^2\alpha & & \\ & 1 & \\ 1 - 2\sin^2\alpha & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

从式(9)可以得知,若各反射镜位置满足式(10)所表示的关系,K 镜的传递矩阵没有改变,即 K 镜同样具有消旋作用

$$\pm(\alpha - \gamma) = \beta \quad (10)$$

式(10)说明 K 镜安装过程中,各反射镜允许出现倾斜偏差,因此在一定程度上降低了 K 镜机械加工的精度要求,同时对 K 镜的准直装调具有一定的指导意义。

2 K 镜消旋策略研究

消旋 K 镜系统安装在国内某地基 2m 口径望远镜 Coude 光路中 M6 镜之后,2m 望远镜主光路图如图 3 所示。K1、K3 镜为椭圆镜,其法线与主光轴成 60°角,镜面长轴为 320mm,短轴 160mm;K2 镜为圆形镜,口径为 160mm。在 2m 望远镜跟踪观测目标过程中,由于主光路需要经过 Coude 系统多片平面镜的折转,目标在 Coude 焦点处会产生像方视场旋转。

2m 望远镜采用地平坐标, A 为方位角,从正北向东计量,范围 0 ~ 360°,对应于方位轴的转动。Z 为天顶距,从天顶向前下方计量,范围为 0 ~ 90°,对

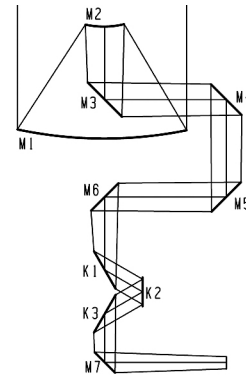


图 3 2m 望远镜主光路图

应于俯仰轴的转动。定义望远镜主光路入瞳处坐标系为 xyz ,坐标系中角度的方向,迎着光线(逆光)观察逆时针方向为正方向。从坐标系 xyz 中分别发出四条光线 $x+$ 、 $x-$ 、 $y+$ 、 $y-$,沿主光路方向最终汇聚至 Coude 像面,光线坐标系 $o-xyz$ 经过 M3、M4、M5、M6、M7 镜之后分别形成局部坐标系 $x_3y_3z_3$ 、 $x_4y_4z_4$ 、 $x_5y_5z_5$ 、 $x_6y_6z_6$ 、 $x_7y_7z_7$,如图 4 所示。

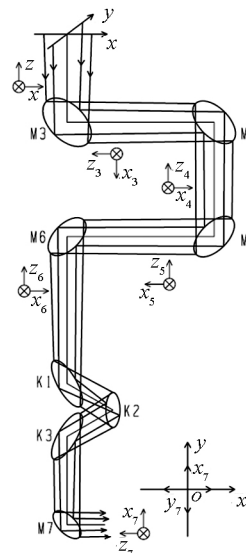


图 4 2m 望远镜 Coude 光路图

M3 镜固定在 2m 主镜之上,其随望远镜方位轴及俯仰轴转动,M4、M5、M6 镜安装在望远镜水平轴立柱上,其随望远镜方位轴转动,当望远镜俯仰轴旋转时,其保持固定状态。K 镜放置于 M6 镜之后,因此我们要建立主光路经过 M6 镜之后的像面旋转与望远镜俯仰轴、方位轴旋转的关系。

当方位轴旋转时,则方位角 A 变化,在 t 时间内,方位角变化 + ΔA,从正北向东方向转动。入射光在 M3 镜发生折转,即从 $x+$ 向 $y+$ 旋转,按照光线追迹推导,入射光经过 M6 镜之后,在局部坐标系 $x_6y_6z_6$ 中,光路按照从 x_6+ 向 y_6+ 转动,迎着光线(逆光)观察逆时针方向旋转,因此主光路经过 M6 镜之后旋转角度为,光路局部坐标系由 xyz 变为

x_6, y_6, z_6' , 如图 5 所示。当俯仰轴旋转时, 则天顶距 Z 变化, 在 t 时间内, 天顶距变化 $+\Delta D$, 迎着光线(逆光)观察俯仰轴逆时针旋转。入射光在 M_4 镜发生折转, 在局部坐标系 x_3, y_3, z_3 中即从 x_3+ 向 y_3- 方向旋转, 按照光线追迹推导, 入射光经过 M_6 镜之后, 在局部坐标系 x_6, y_6, z_6 中, 光路仍按照从 x_6+ 向 y_6- 转动, 迎着光线(逆光)观察顺时针方向旋转, 因此主光路经过 M_6 镜之后旋转角度为, 光路局部坐标系由 x_6, y_6, z_6' 变为 x_6, y_6, z_6'' 。

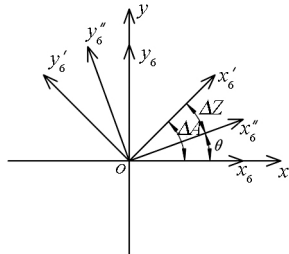


图 5 局部坐标系旋转示意图

在 t 时间内, 望远镜入射光经过 Coude 光路 M_6 镜之后, 由俯仰轴、方位轴旋转带来的角度变化为

$$\Delta\theta = \Delta A - \Delta Z \quad (11)$$

对上式求全微分, 即

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\Delta A - \Delta Z}{\Delta t} = \omega_A - \omega_Z \quad (12)$$

那么相应地, K 镜旋转按照式(9)所示的规则进行, 则可消除 2m 望远镜 Coude 像面的视场旋转

$$\omega_k = \frac{1}{2} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = 1/2(\omega_A - \omega_Z) \quad (13)$$

由图 4 所示的由光线追迹方法所建立的望远镜 Coude 光路内各局部坐标系的关系, 由于 Coude 反射镜及 K 镜的引入, 望远镜 Coude 焦点处的成像位姿 (x_7, y_7, z_7) 较其实际位姿 (xyz) 旋转 $\pi/2$ 。为了保证望远镜 Coude 焦面成像位姿的准确性, 需要旋转 K 镜方向角。按照第 1 节 K 镜光学传递矩阵理论可知, 若像方沿光轴中心旋转角度 $\pi/2$, 则 K 镜相应的旋转 $\pi/4$, 可保证目标成像位姿不变, 即 Coude 焦面处的局部坐标系 (x_7, y_7, z_7) 与初始坐标系 (xyz) 重合。

如图 6 所示, 此时局部坐标系与初始坐标系重合。 K 镜处于方向角 $-\pi/4$ 时, 其定义为 2m 望远镜零位。

3 准直技术及误差分析

为保证 K 镜具有最好的消旋效果, 必须要确保 K 镜光轴、 K 镜机械回转轴及 2m 望远镜主光轴三轴重合。

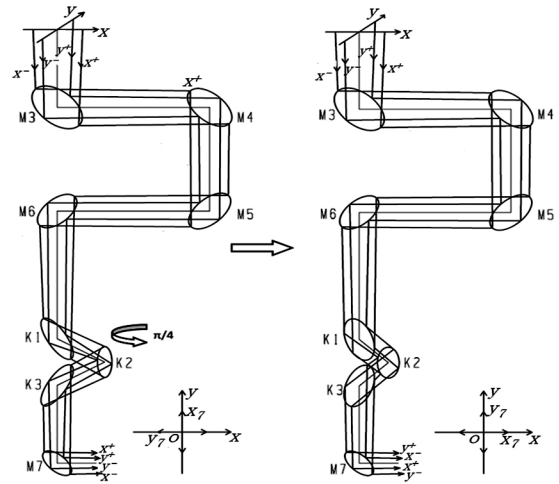


图 6 望远镜 Coude 光路光线追迹
(K 镜方向角旋转 $\pi/4$)

设望远镜主光轴为 K_1 , K 镜光轴为 K_2 , K 镜机械轴为 K_3 , 主光路经过 K 镜后的光轴为 K_4 。在一般情况下, K_1, K_2, K_3 之间会存在位移或角度偏差, 定义 K_1, K_3 轴之间的偏差为 ΔD_1 , K_2, K_3 轴之间的偏差为 ΔD_2 , K_1, K_4 轴之间的偏差为 ΔD_3 , K 镜机械轴旋转角度为 θ , 那么根据式(3)所推导的 K 镜光学传递矩阵可得如下关系

$$\Delta D_3 = 2(\Delta D_1 \cos\theta - \Delta D_2) \quad (14)$$

主光轴经过 K 镜后的偏差 ΔD_3 与 K 镜机械轴转动角度 θ 在极坐标下的曲线形式如图 7 所示。

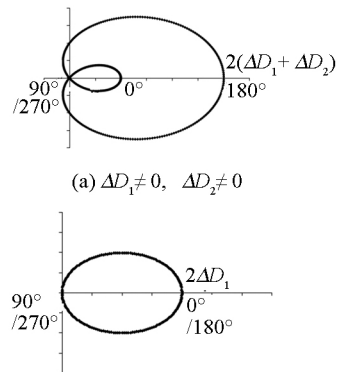


图 7 K 镜准直误差曲线

从曲线分析可知, 当主光轴与 K 镜机械轴、 K 镜机械轴与 K 镜光轴存在偏差, 旋转 K 镜机械轴时, 主光轴经过 K 镜后会产生周期性变化的偏差量, 由 K 镜传递矩阵原理可知, 若 K 镜旋转 1 周, 入射光旋转 2 周, 因此由主光路与 K 镜机械轴的偏差 ΔD_1 会形成 2 周封闭的曲线, 而由 K 镜光轴与 K 镜机械轴的偏差 ΔD_2 会导致 2 周曲线不重合, 由图 7(a) 可知, 偏差量最大值为 $2(\Delta D_1 + \Delta D_2)$ 。而当消除 K 镜机械轴与 K 镜光轴之间的偏差, 即时, 偏差曲线会形成 2 周重合的封闭曲线, $\Delta D_2 = 0$ 偏差量最

大值为 $2\Delta D_1$, 如图 7(b) 所示。

根据误差曲线的规律性变化, 设计如下准直装调策略: 首先调整 K 镜内部反射镜 K1、K3 的倾斜, 使误差曲线在 0° 位置的误差点和 180° 位置的误差点不断逼近, 直至重合, 此时 K 镜机械轴与 K 镜光轴偏差 $\Delta D_2=0$ 。然后调整 K 镜整体平移及倾斜, 使图 5 的封闭的圆周曲线不断缩小, 直至趋近至零点。至此, $\Delta D_1=\Delta D_2=\Delta D_3=0$, 主光轴 K_1 、K 镜光轴 K_2 、K 镜机械轴 K_3 三轴重合。

为满足 K 镜系统的准直功能, K1、K3 镜具备二维倾斜调整功能, K 镜整体具备二维平移及两维倾斜的调整功能, 如图 8 所示。

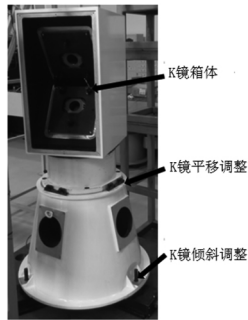


图 8 K 镜系统结构

2m 望远镜 K 镜系统放置于 M6 镜与 M7 镜之间。在主光路中放置具有自调焦功能的测微准直望远镜(CZW), 在 K 镜之后沿主光路分别放置 2 个 CCD, 用于记录主光路经过 K 镜后的位移轨迹, 如图 9、10 所示。

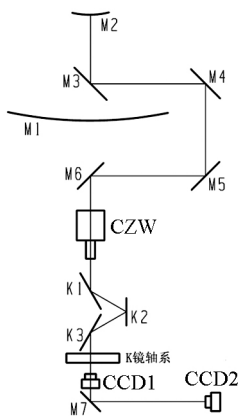


图 9 K 镜准直方案示意图

按照既定设计的准直方案, 具体的调整步骤为: 旋转 K 镜, 观察光轴经过 K 镜后在两块 CCD 上的运动轨迹点, 并每转 30° 进行计数, 实验标定过程各个阶段如图 11 所示。在 K 镜机械轴旋转至 0° 及 180° 位置时, 分别反复迭代调整调整 K1、K3 镜倾斜, 使 CCD1 中的 0° 点位置、CCD2 中的 180° 点位置不断向目标点逼近, 如图 11(a) 所示。直至调整至

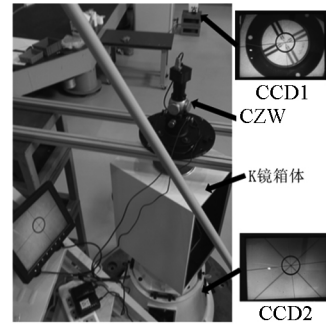


图 10 K 镜准直实验测试

图 11(d) 时, CCD 所显示的误差曲线表明已消除 K 镜机械轴与 K 镜光轴之间的偏差, 即 $\Delta D_2=0$ 时。然后反复迭代调整 K 镜整体的平移及倾斜, 使 CCD1、CCD2 中 0° 及 180° 位置的光点轨迹点不断逼近于零点。

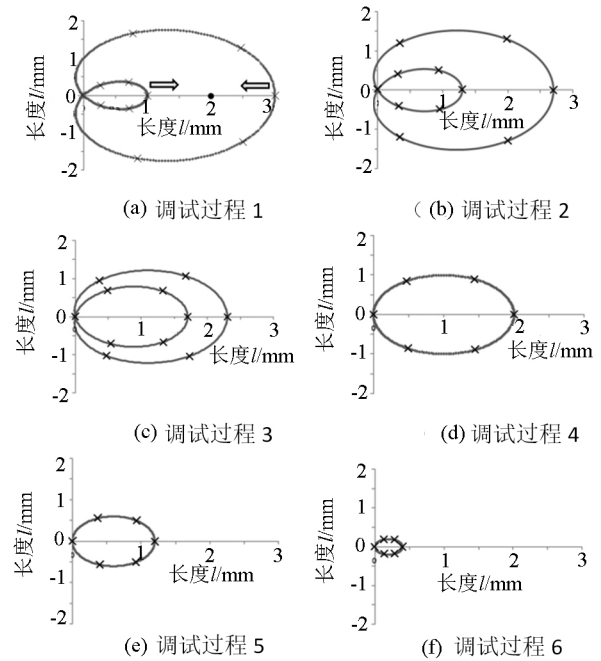


图 11 K 镜准直标定光点记录 (CCD2)

由于 K 镜轴系精度、气流扰动等影响, 光点轨迹不可能完成重合于零点, 准直标定最终状态如图 11(f) 所示。CCD2 距离测微准直望远镜距离约为 $H=20\text{m}$, 光点轨迹最大偏移量为 $\Delta D_3=0.4\text{mm}$, 由此可计算最终的准直精度 σ 约为

$$\sigma = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta D_3}{H} \right) = 4'' \quad (15)$$

4 结 论

本文针对国内某 2m 地平式望远镜像方视场旋转问题, 提出了 K 镜消旋方法。利用光学追迹, 推导望远镜 K 镜系统初始零位及其消旋策略。针对 K 镜的准直精度问题, 根据其在旋转过程望远镜主光轴偏差的周期性变化特性, 设计了基于帕斯卡窝

线理论的准直装调方法,并建立 K 镜准直装调的数学计算模型。通过反复迭代修正模型中的关键参数,使误差曲线不断趋近于最优值。本文所探讨的望远镜 K 镜消旋策略及其准直精度研究方法逻辑清晰,易于理解,其对带有 Coude 光路系统的大型望远镜像旋问题具有一定的研究意义及工程应用价值。

参考文献:

- [1] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327—336.
Zhang Jingxu. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. Chinese Optics, 2012, 5(4): 327—336.
- [2] 赵勇志, 邵亮, 明名, 等. 大口径望远镜主镜支撑系统装调[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 31—38.
Zhao Yongzhi, Shao Liang, Ming Ming, et al. Assembly for large aperture telescope primary mirror support system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(9): 31—38.
- [3] 安其昌, 张景旭, 杨飞, 等. 基于结构函数的大口径望远镜中频误差分配研究[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 433—440.
An Qichang, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. On middle frequency error distribution of large telescope based on structure function[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(2): 433—440.
- [4] 惠刚阳, 杨海成, 姜峰, 等. 潜望式瞄准镜中消像旋棱镜的装调工艺技术[J]. 应用光学, 2013, 34(4): 700—705.
Hui Gangyang, Yang Haicheng, Jiang Feng, et al. Alignment technology of offsetting image rotation prism in periscopic sight[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(4): 700—705.
- [5] Bettina Altmann, Christian Pape, Eduard Reithmeier. Temperature measurements on fast-rotating objects using a thermographic camera with an optomechanical image derotator[J]. Proc. of SPIE, 2017, 10(4): 41—47.
- [6] 王岱, 李晓燕, 吴钦章. 某光测设备上消像旋的设计[J]. 光电工程, 2012, 39(1): 108—112.
Wang Dai, Li Xiaoyan, Wu Qinzhang. Design of eliminating image rotation on opto-electronic imaging tracking and measuring device[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(1): 108—112.
- [7] 鞠青华, 李语强, 熊耀恒. 1.2m 地平式望远镜视场旋转角的理论计算[J]. 天文研究与技术, 2009, 6(1): 28—35.
Ju Qinghua, Li Yuqiang, Xiong Yaoheng. Theoretical calculation of the field-of-view rotation angles for the 1.2m altazimuth telescope in the yunnan observatory[J]. Astronomical Research & Technology, 2009, 6(1): 28—35.
- [8] 魏烨艳, 王东光, 梁明, 等. 天文望远镜消旋 K 镜光学结构设计及分析[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 21—30.
Wei Yeyan, Wang Dongguang, Liang Ming, et al. Design and analysis of the optical structure for k mirror in astronomical telescopes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 21—30.
- [9] 郭鹏, 张景旭, 杨飞, 等. 2m 望远镜 K 镜支撑结构优化设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1914—1919.
Guo Peng, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Optimum design of support structure for 2m telescope's K mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1914—1919.
- [10] Brunelli A, Bergomi M, Dima M, et al. Tips & tricks for aligning an image derotator[J]. Proc. of SPIE, 2012, 8446(1): 1—10.
- [11] Jeremie Baudet, Laurent Jolissaint, Onur Keskin, et al. Design of a derotator for 4m DAG telescope[J]. Proc. of SPIE, 2017, 9908(5): 1—6.
- [12] Santiago Barboza, Jorg Uwe Pott, Ralf Rainer Rohloff, et al. Design of a large image derotator for the E-ELT instrument MICADO[J]. Proc. of SPIE, 2016, 9908(9): 1—14.
- [13] Jin Xu, Changzhi Ren, Yu Ye. Optics derotator servo control system for SONG telescope[J]. Proc. of SPIE, 2017, 8444(4): 1—7.