

天文望远镜消旋K镜光学结构设计及分析

魏烨艳^{1,2} 王东光¹ 梁明³ 侯俊峰¹ 邓元勇¹ 张志勇¹ 孙英姿¹

¹中国科学院国家天文台太阳活动重点实验室, 北京 100012

²中国科学院大学, 北京 100049

³美国国家光学天文台, 亚利桑那 图森 85726

摘要 大型光学天文望远镜中存在由于不同坐标系转换造成的物方视场旋转和望远镜内部光路中折轴平面反射镜之间的相对转动造成的像方视场旋转。为了提高空间分辨率和获得稳定的图像,需要对视场旋转进行补偿(消旋)。采用K镜作为消旋器件,并通过矩阵方法分析其消旋原理及消旋条件,由此把K镜分为两种结构:对称式和非对称式。与棱镜类似,K镜对系统光轴和成像有影响。在设计时,K镜的口径、体积和角度需要考虑加工装调和望远镜整体光路的要求,在满足要求后,可进行一定的优化。用Zemax可实现对K镜的光学设计,最后用空间几何关系来计算装调误差,并利用MATLAB和Zemax得到误差分析结果。

关键词 光学设计; K镜; 矩阵分析; 优化条件; 装调误差

中图分类号 TB133

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0316002

Design and Analysis of the Optical Structure for K Mirror in Astronomical Telescopes

Wei Yeyan^{1,2} Wang Dongguang¹ Liang Ming³ Hou Junfeng¹ Deng Yuanyong¹
Zhang Zhiyong¹ Sun Yingzi¹

¹Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100012, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³National Optical Astronomy Observatory, Tucson, Arizona 85726, USA

Abstract Two kinds of field rotation occur in large optical telescopes, one is caused by the coordinate transformation between horizontal coordinate system and equatorial coordinate system, the other is caused by the mutual rotation among fold mirrors in telescope. In order to get high spatial resolution and stationary image, field rotation compensation is required. Now K mirror, as a derotator, is widely applied. Using matrix can explain the principal of K mirror and achieve the requirements for derotation, which leads to two sorts of K mirror: the symmetric and asymmetric. Similar to prisms, K mirror can affect the optical axis and imaging. Considered the requirements of machining, assembly and the total optical path, the aperture, volume and base angles of K mirror have been analyzed and optimized in this paper. An example of the symmetric K mirror is designed by Zemax. The tolerance of assembly and alignment have been explained by 3D-geometric relationship and calculated by Zemax and MATLAB.

Key words optical design; K mirror; matrix analysis; optimized condition; tolerance of assembly and alignment

OCIS codes 220.3620; 120.4570

收稿日期: 2015-09-25; 收到修改稿日期: 2015-11-12

基金项目: 国家基金委(11427901, 11373044)、国家自然科学基金(11273034, 11373042, 11178005)、国家自然科学基金青年基金(11403047)

作者简介: 魏烨艳(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学望远镜消旋方面的研究。E-mail: yywei@bao.ac.cn

导师简介: 王东光(1966—), 女, 博士, 研究员, 主要从事光学偏振方面的研究。E-mail: wdg@bao.ac.cn

1 引 言

常用的消旋方法有物理消旋、电子消旋和光学消旋^[1]。物理消旋不适合配备了各种结构复杂、质量和尺寸较大的光学电子设备的大型望远镜^[2]。而电子消旋因为其存在延时,无法长时间积分等优点同样也不适用于望远镜中^[3-4]。

光学消旋是通过在成像器件前装一光学元件,依靠其转动导致目标光线的转动,从而使图像旋转。曾经使用过的光学消旋器件多为基于 Dove 棱镜或者 Abbe 棱镜原理所设计的消旋棱镜^[5-6],但棱镜会对会聚或发散的入射图像产生像差^[7]。如今使用的 K 型反射镜可以避免这种缺点。大部分文章给出的消旋棱镜的底角为 45°,K 镜的底角为 30°,但没有给出具体的解释和分析。而国外大型望远镜的消旋器件的底角都不相同(例如 E-ELT 为 28°^[8],WHT 为 26.1°^[9],GEMINI 为 25°^[10])。

本文利用几何光学和空间坐标系旋转矩阵的方法来解释 K 镜的消旋原理和底角的关系。基于 Dove 棱镜设计的 K 镜,通过分析其光学性质,可验证消旋原理。提出 K 镜需要满足的设计要求,由此计算得到 K 镜的口径、体积、优化条件和误差的具体解析式,并用 Zemax 完成 K 镜的设计。

2 K 镜光学性质分析

2.1 K 镜消旋原理

K 镜基于 Dove 棱镜设计,Dove 棱镜如图 1(a)所示,它作为折射式消旋器件的特点是,当它绕平行于反射面的轴旋转 θ 角时,物体的反射像将转过 2θ 角^[11]。K 镜就是把 Dove 棱镜的两个入射面都换成反射面,同时保留底面的反射面。图 1(b)对 K 镜进行成像分析,图中 K 镜的第一面镜子 KM1 和第三面镜子 KM3 分别有两个底角 β_1 和 β_3 ,第二面镜子 KM2 平行于 K 镜光轴(当光线沿着该轴入射,出射光线与入射光线共线)。

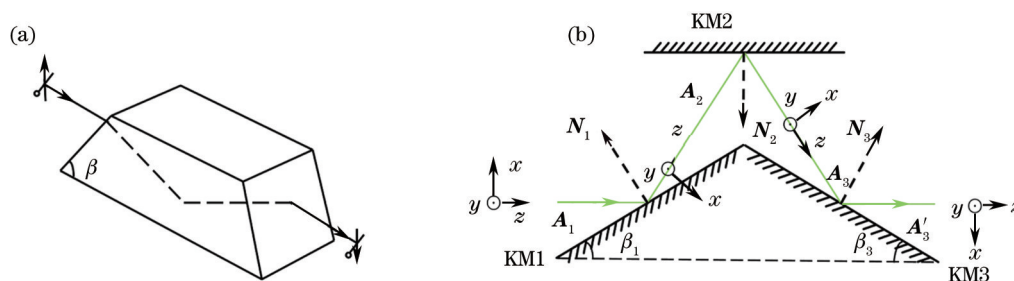


图 1 (a) Dove 棱镜成像光路; (b) K 镜的成像分析

Fig.1 (a) Optical path of the Dove prism; (b) imaging analysis of K mirror

下面用矩阵的方法来证明 K 镜具有消旋的作用^[12]。建立如图 1(b)所示的物空间坐标系为全局坐标系,入射光矢量 \mathbf{A} 与反射光矢量 \mathbf{A}' 的关系为

$$\mathbf{A}' = \mathbf{M}\mathbf{A}, \tag{1}$$

其中 \mathbf{M} 为反射作用矩阵^[13],其具体形式为

$$\mathbf{M} = \mathbf{I} - 2\mathbf{N} \cdot \mathbf{N}^T = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

式中 \mathbf{I} 为 3×3 单位矩阵, \mathbf{N} 为镜面的法线向量单位矩阵 $[N_x \ N_y \ N_z]^T$ 。

静止时 K 镜各镜面的法线向量单位矩阵为

$$\mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} \cos\beta_1 \\ 0 \\ -\sin\beta_1 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_3 = \begin{bmatrix} \cos\beta_3 \\ 0 \\ \sin\beta_3 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

假设一任意方向的入射光的矢量矩阵表示为 $\mathbf{A}_1 = [A_{1x} \ A_{1y} \ A_{1z}]^T$ 。

若入射光绕望远镜光轴(z轴)旋转 θ ,同时 K 镜的旋转方向与入射光旋转方向一致,其旋转角度为 $\theta/2$,保证望远镜光轴、K 镜旋转轴、K 镜光轴三轴共线,则入射光矩阵变为

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{1x} \\ A_{1y} \\ A_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1x} \cos \theta - A_{1y} \sin \theta \\ A_{1y} \cos \theta + A_{1x} \sin \theta \\ A_{1z} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

同时, K 镜各镜面的法线向量变为

$$N_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) \cdot \cos \beta_1 \\ \sin(\theta/2) \cdot \cos \beta_1 \\ -\sin \beta_1 \end{bmatrix}, N_2 = \begin{bmatrix} -\cos(\theta/2) \\ -\sin(\theta/2) \\ 0 \end{bmatrix}, N_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) \cdot \cos \beta_3 \\ \sin(\theta/2) \cdot \cos \beta_3 \\ \sin \beta_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

由此可以得到各镜面的作用矩阵为

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 - 2 \cos^2 \beta_1 \cdot \cos^2(\theta/2) & -\cos^2 \beta_1 \cdot \sin \theta & \sin 2\beta_1 \cos(\theta/2) \\ -\cos^2 \beta_1 \cdot \sin \theta & 1 - 2 \cos^2 \beta_1 \cdot \sin^2(\theta/2) & \sin 2\beta_1 \sin(\theta/2) \\ \sin 2\beta_1 \cos(\theta/2) & \sin 2\beta_1 \sin(\theta/2) & \cos 2\beta_1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 - 2 \cos^2 \beta_3 \cdot \cos^2(\theta/2) & -\cos^2 \beta_3 \cdot \sin \theta & -\sin 2\beta_3 \cos(\theta/2) \\ -\cos^2 \beta_3 \cdot \sin \theta & 1 - 2 \cos^2 \beta_3 \cdot \sin^2(\theta/2) & \sin 2\beta_3 \sin(\theta/2) \\ -\sin 2\beta_3 \cos(\theta/2) & -\sin 2\beta_3 \sin(\theta/2) & \cos 2\beta_3 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

整个 K 镜的作用矩阵为

$$M = M_3 \cdot M_2 \cdot M_1 = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

如果 K 镜要发挥像旋的作用(即出射光线与其余参量无关, 只与旋转角度有关), 则 M 应该与旋转矩阵 R_z 具有相似的结构:

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) & 0 \\ \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

通过对比可以得出 $M_{13} = \sin 2(\beta_1 - \beta_3) \cos(\theta/2) = 0 \rightarrow \beta_1 - \beta_3 = 0 \rightarrow \beta_1 = \beta_3$ 。满足此条件时

$$M = \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$A_3 = M \cdot A_1 = \begin{bmatrix} -A_{1x} \\ A_{1y} \\ A_{1z} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由此可知出射像为入射像的倒像, 这与图 1(b) 的成像分析结果一致, 而且出射像是静止的, 与旋转角度 θ 没有关系, 说明当 K 镜的旋转速度是入射像旋转速度的一半且同向, 在满足条件 $\beta_1 = \beta_3$, 并且望远镜光轴、K 镜旋转轴、K 镜光轴三轴共线时, K 镜具有消除像旋转的作用。

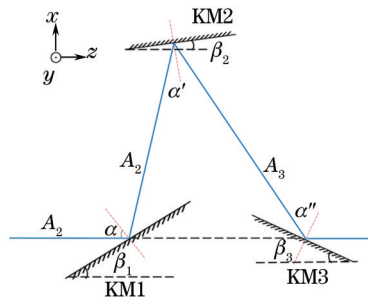


图 2 非对称式消旋 K 镜光路图
Fig.2 Optical path of the asymmetric K mirror

有一种非对称的情况,如图2所示,KM2并非平行于K镜光轴。用上述方法可以证明,当三面镜子的倾角满足 $\beta_2 + \beta_3 = \beta_1$ 的情况下,此类型的K镜同样具有消旋作用。但是由于非对称式K镜的安装和校准比较复杂,易出现较大的误差,所以大部分的消旋K镜采用对称式的结构。

2.2 K镜对系统光轴和成像的影响

类似反射棱镜,K镜的转动会引起整个望远镜系统光轴方向和成像方向的变化。根据棱镜转动定理:当物空间坐标系 xyz 不动,棱镜绕转轴 \mathbf{P} 转动 θ 角后,像空间坐标系 $x'y'z'$ 首先绕 \mathbf{P}' (\mathbf{P}' 为 \mathbf{P} 在像空间的共轭向量) 转 $(-1)^{N-1}\theta$, 然后绕 \mathbf{P} 转 θ (N 是棱镜的反射次数)^[11]。

棱镜转动引起的像空间坐标系方位变化情况的矩阵方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}'' \\ \mathbf{j}'' \\ \mathbf{k}'' \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{OP} \mathbf{R}_{OP'} \begin{bmatrix} \mathbf{i}' \\ \mathbf{j}' \\ \mathbf{k}' \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中 $\mathbf{i}', \mathbf{j}', \mathbf{k}'$ 为坐标系 $x'y'z'$ 的三个单位基向量。 $\mathbf{i}'', \mathbf{j}'', \mathbf{k}''$ 为像空间坐标系 $x''y''z''$ 绕 \mathbf{P}' 轴转动 $(-1)^{N-1}\Delta\theta$ 后再绕 \mathbf{P} 轴转 $\Delta\theta$ 所成的新像空间坐标系 $x''y''z''$ 的三个单位基向量。 \mathbf{R}_{OP} 为绕 \mathbf{P} 轴的转动矩阵, $\mathbf{R}_{OP'}$ 为绕 \mathbf{P}' 轴的转动矩阵,

$$\mathbf{R}_{OP} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\theta \cos \gamma' & -\Delta\theta \cos \beta' \\ -\Delta\theta \cos \gamma' & 1 & \Delta\theta \cos \alpha' \\ \Delta\theta \cos \beta' & -\Delta\theta \cos \alpha' & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{R}_{OP'} = \begin{bmatrix} 1 & (-1)^{N-1}\Delta\theta \cos \gamma & (-1)^N \Delta\theta \cos \beta \\ (-1)^N \Delta\theta \cos \gamma & 1 & (-1)^{N-1}\Delta\theta \cos \alpha \\ (-1)^{N-1}\Delta\theta \cos \beta & (-1)^N \Delta\theta \cos \alpha & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中 α, β, γ 分别为 \mathbf{P} 轴与物空间坐标系 x, y, z 轴的夹角, 也为 \mathbf{P}' 轴与像空间坐标系 x', y', z' 轴的夹角, α', β', γ' 分别为转轴 \mathbf{P} 与坐标系 x', y', z' 轴的夹角。

把以上理论应用于K镜系统中,对于K镜来说, $N=3$ 。若假设转轴 \mathbf{P} 为望远镜的光轴,此时, $\alpha = \alpha' = \beta = \beta' = 90^\circ, \gamma = \gamma' = 0^\circ$ 。所以

$$\mathbf{R}_{OP} \mathbf{R}_{OP'} = \begin{bmatrix} 1 - \Delta\theta & 2\Delta\theta & 0 \\ -2\Delta\theta & 1 - (\Delta\theta)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

在K镜旋转前,整个系统的光轴沿着 \mathbf{k}' 方向,旋转后光轴沿着 \mathbf{k}'' 方向, $\Delta\mathbf{k}' = \mathbf{k}'' - \mathbf{k}'$ 就为光轴方向的改变。 \mathbf{j}' 为成像方向, \mathbf{j}'' 与 \mathbf{j}' 的差在 \mathbf{i}' 方向分量 $\Delta\mathbf{j}'$ 就是像倾斜。计算得到 $\Delta\mathbf{k}' = 0, \Delta\mathbf{j}' = -2\Delta\theta\mathbf{i}'$ 。这个结果说明,以望远镜光轴为旋转轴时,光轴的方向不发生改变,并且像的旋转速度是K镜旋转速度的2倍,这与矩阵方法的结果一致。

另一种情况是,若转轴 \mathbf{P} 为 x 轴,即K镜系统绕 x 轴旋转的情况。此时 $\alpha = \alpha' = 0^\circ, \gamma = \gamma' = \beta = \beta' = 90^\circ$, 可以得到 $\Delta\mathbf{k}' = \Delta\mathbf{j}' = 0$ 。由此可知K镜整体绕 x 轴转动并不会影响整个系统的光轴方向和成像的改变,这说明在装调时整体在 x 轴的旋转是允许的。

3 K镜光学设计

K镜的设计除了需要满足之前得到的倾角条件,还要方便实际使用时的情况。首先,在K镜放入前后,整个光路的变化不能影响到望远镜后端成像设备和一些光谱分析设备的位置,这就要求光束经过K镜后方向不变。同时还要保证中心视场的主光线经K镜后高度不变。其次,在K镜的三面镜子中反射的光线不能被遮挡,这在一定程度上要求了K镜各个面的口径和位置。最后,在满足上述两个条件的情况下,进行优化,尽量减小K镜的口径和体积。

3.1 三面镜子的倾角设计

为了同时满足光束经过K镜后方向不变和主光线的高度不变,也就是保证焦点位置仍在光轴上,图2中,在入射光为会聚光的情况下,要求主光线偏转的角度为 0° , 即 $(180^\circ - 2\alpha_1) - (180^\circ - 2\alpha'_1) + (180^\circ - 2\alpha''_1) = 0$ 。得到

$\beta_3 + \beta_2 + \alpha_1 = 90^\circ$, 对于主光线 $\alpha_1 = 90^\circ - \beta_1$, 满足其方向不变的则要达到 $\beta_2 + \beta_3 = \beta_1$, 而此条件也是 K 镜消旋的条件。当设计对称式 K 镜时, 保证所有的光线都能反射到 KM3 上, 则 $\beta_{1,3} < \alpha_1$, 即 $\beta_{1,3} < 45^\circ$ 。

常见的 Dove 棱镜底角为 45° , 但根据不同折射率的棱镜, 可以得到最优的角度使棱镜的体积最小, 比如选用 BK7, 最优的底角为 32.5° , 这是根据光在棱镜经过的光程最小的原则^[14-15]。K 镜是反射型消旋器件, 所以不存在材料的折射率对倾角的影响, 但仍然可以用光程最小原则计算一种特殊的 K 镜: 在准直光路中的对称式 K 镜。当倾角为 30° 时, K 镜的体积是最小的^[16]。然而, 望远镜从副镜出来的光线为会聚光, 倾角为 30° 并不能满足最小光程的原则。所以, K 镜的倾角选择与需要考虑望远镜系统参数、K 镜在光路中的位置、接收器的位置、设计时 K 镜的体积限制, 同时还要考虑到加工和装调的方便。这样并没有一个绝对的优化角度, 但可以尽量设计对称式并且倾角便于装调的 K 镜。

3.2 K 镜口径和体积设计

KM1 镜的口径可以通过几何光学和空间关系求出具体的解析式, 但 KM2 的口径与图 3 中的 h 有关, h 又决定了 K 镜的体积, 这些都是相互关联的。K 镜的体积与光线经过 K 镜折返的光程有关, 若要使得 K 镜体积尽可能小, 则主光线在 K 镜内部所走的光程要尽可能小, 即

$$B = \frac{h}{\sin 2\beta_1} + \frac{h}{\sin\left(\beta_3 + \frac{\pi}{2} - \alpha_1\right)} = \frac{h}{\sin 2\beta_1} + \frac{h}{\sin(2\beta_1 - 2\beta_2)} \rightarrow \min. \quad (17)$$

要保证主光线的高度不变, 在各面镜子倾角固定的情况下, 起决定性因素的是三面镜子的相对位置。如图 3 所示建立一个二维直角坐标系来分析, 把望远镜的主镜和副镜等同为一个口径为 A , 焦距为 f 的近轴面, 面的中心设为原点, 光轴所在位置设为 x 轴, 与其垂直的方向设为 y 轴。主光线从近轴面到 KM1 的距离为 l_1 , 主光线在 KM1 的入射点 O_2 与 KM3 的入射点 O_4 的距离为 l , 在 KM2 的入射点 O_3 到光轴的距离为 h 。

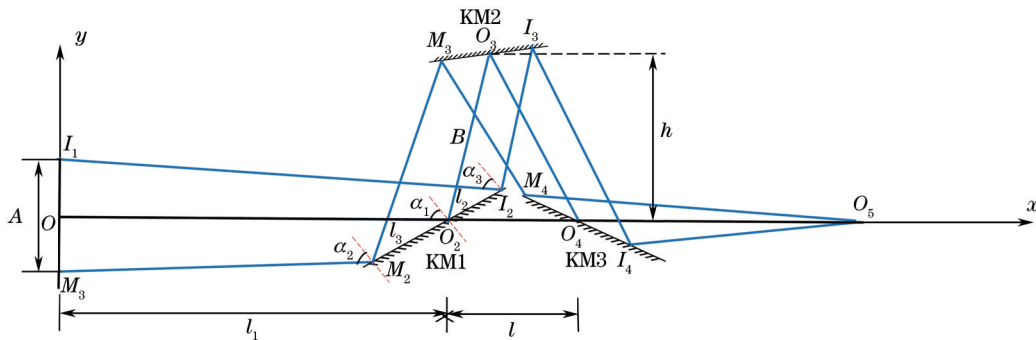


图 3 二维坐标系下的消旋 K 镜
Fig.3 K mirror in 2D coordinate system

通过图 3 可以得到一些直线方程和点的坐标, O_3O_4 的直线方程为

$$y - h = -\tan 2(\beta_1 - \beta_2) \cdot \left(x - \frac{h}{\tan 2\beta_1} - l_1\right), \quad (18)$$

KM3 的直线方程: $y = -\tan \beta_3(x - m)$, 其中 m 为 KM3 在 x 轴上的截距。

主光线的出射光线与入射光线高度一致, 说明 KM2 的反射光线 O_3O_4 与 KM3 的交点 O_4 在 x 轴上, 所以 m 必须满足

$$m = \frac{h}{\tan 2(\beta_1 - \beta_2)} + \frac{h}{\tan 2\beta_1} + l_1, \quad (19)$$

可得 KM1 与 KM3 在光轴上的距离: $l = \frac{h}{\tan 2(\beta_1 - \beta_2)} + \frac{h}{\tan 2\beta_1}$ 。

K 镜不遮挡光束的临界情况也就是在刚好满足 K 镜通光口径的情况下, 又不会过长而遮挡光束。也就是 KM1 的最上端遮挡了入射光束最下端从 KM2 反射的光线 M_3M_4 ; KM3 的最上端遮挡了入射光束最上端从 KM1 反射的光线 I_2I_3 。即点 I_2 在直线 M_3M_4 上, 点 M_4 在直线 I_2I_3 上。 M_2M_3 的直线方程:

$$y + l_3 \sin \beta_1 = \tan(2\beta_1 - \gamma) \cdot (x - l_1 + l_3 \cos \beta_1), \quad (20)$$

KM1的直线方程:

$$y = \tan\beta_1 \cdot (x - l_1), \quad (21)$$

其中 $l_2 = \frac{\sin\gamma \cdot (f - l_1)}{\sin(\gamma + \beta_1)}$, $l_3 = \frac{\sin\gamma \cdot (f - l_1)}{\sin(\beta_1 - \gamma)}$, $\gamma = \arctan \frac{A}{2f}$, γ 为视场角。求得临界情况, 得到 KM1 与直线 M_3M_4 的交点坐标 (m_1, n_1) , 应该满足

$$l_1 + l_2 \cos\beta_1 < m_1, \quad l_2 \cos\beta_1 < n_1. \quad (22)$$

同理, 直线 I_2I_3 与 KM3 的交点 (m_2, n_2) 与 M_4 的坐标 (x_4, y_4) 应满足

$$x_4 > m_2, \quad y_4 < n_2. \quad (23)$$

(17)、(22)、(23)式都是针对 K 镜设计要求对 K 镜的倾角、体积和口径进行优化, 给出限制条件。而在设计过程中, 已知望远镜整体光路的情况下, 需要先确定 K 镜各面镜子的倾角, 再根据以上的限制条件得到 K 镜各面镜子之间的距离, 最后 K 镜的口径就根据空间几何关系计算得到。

3.3 Zemax 对 K 镜的设计

虽然口径的计算并不需要很难的方法, 但其解析式非常复杂, 尤其是多个视场的情况下, 就需要考虑每个视场反射在镜面的情况。所以, 真正的设计都是靠光学设计软件完成的, 采用 Zemax 光学设计软件设计倾角为 30° 的对称式 K 镜。

设计时把望远镜的主镜和副镜等效于一个近轴面。确定好 K 镜在光路中的位置和倾角之后, 需要查看光线追迹和三维视图的结果不断调试镜面之间的距离, 这样做是为了满足不遮挡光束的条件。而 K 镜的口径能够通过 Zemax 自动得到, 即把“半直径”的“求解类型”设置为自动。图 4 是设计的 K 镜的三维图, 望远镜等效为口径 $A = 10^3 \text{ mm}$, $f = 10^4 \text{ mm}$ 的近轴面, 并把 KM1 镜到近轴面的距离设为 $l_1 = 9200.0 \text{ mm}$ 。通过观察三维图的结果能够确定主光线从 KM1 到 KM2 的最佳光程为 150 mm , 由于对称性, KM2 到 KM3 的最佳光程也为 150 mm , 即可以把 Zemax 中 KM1 和 KM2 的厚度设置为 150 mm 。

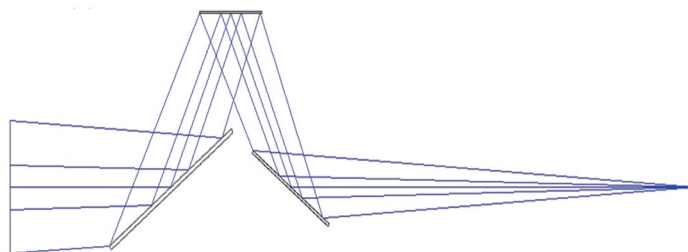


图 4 Zemax 设计的倾角为 30° 的对称式 K 镜三维图

Fig.4 3D layout of a symmetric K mirror (base angle is 30°) designed by Zemax

为了满足光束经过 K 镜后方向不变(各镜偏角转向角之和应为 90°)和主光线经过 K 镜后高度不变, 需要自定义评价函数。角度要求可以通过评价函数操作数“PMVA”来实现。为了保证主光线的方向, 则要求在最开始的入射面和出射面的光线位置始终在中心处, 这可用操作数“RAGA”、“RAGB”、“RAGC”、“DIFF”组合来实现。

自动得到的口径大小可以通过 Zemax 中的光线足迹图查看。光迹图可以显示任意面上叠加的光线的痕迹^[17]。图 5 是设计的 K 镜在有视场的情况下各面镜子的光迹图及视场数据。光迹图中给出了光线在 x 轴和 y 轴方向的最大最小坐标值, 光迹图中边缘的方形是镜面的面形, 可以根据光线的坐标值在“表面性能”的“孔径”选项中选择。

4 误差分析

消旋 K 镜的误差来源有三种^[18]: 1) 各平面镜的平面质量, 其对像质产生影响; 2) 各平面镜的偏轴误差; 3) 各平面镜相互间的位置误差。平面镜的质量由生产商控制, 所以这里针对 K 镜的安装误差, 也就是偏轴和位置误差进行分析。一个平面镜有 6 个自由度。在建立三维坐标系后, 这 6 个自由度可以分别描述为在 x 、

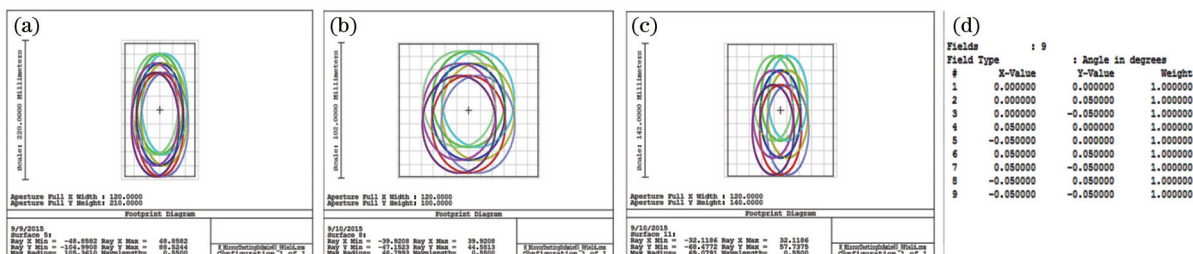


图5 有视场时倾角为30°的对称式(a) KM1, (b) KM2, (c) KM3的光迹图; (d) 视场数据

Fig.5 Footprint diagrams of (a) KM1, (b) KM2, (c) KM3 (symmetric, base angle is 30°) when add fields; (d) fields data

y, z 轴平移和以 x, y, z 为轴的旋转。但是并不需要计算所有的误差,通过分析可知其中一些位置或者角度的变化对最终的图像位置并没有影响。通过理论分析可知,对成像结果不产生影响的误差有5个,分别是(以Zemax上默认的全局坐标系为准):KM1在 x 方向的平移,KM2在 x 方向的平移,KM2在 z 方向的平移,KM2绕 x 轴的旋转,KM3在 y 方向的平移。

为了方便计算,可通过分析主光线来计算像的偏移量。根据旋转矩阵的方法和空间几何关系,可以求出主光线每次反射后的空间直线方程,最后可以得到像面的入射点的坐标。这样就得到了偏差量的具体解析式,最后采用均方根来统计这些误差量产生的影响^[8]。在计算角度误差时需要注意:1) 规定角度旋转方向的正负;2) 各平面镜绕各坐标轴方向旋转,确定平面镜的旋转点(旋转点的旋转需要根据平面镜的支撑方式决定),以及K镜整体的旋转点。

通过解析式,可以分析单个误差能够看出误差量与像的偏移量的关系。在实际安装过程中,只有一种误差出现的情况是很少的,大部分是多种误差一起出现的情况,这样可能有某两个误差或几个误差相互抵消的情况,这样需要把所有误差综合在一起考虑。Zemax软件很好地解决了这个问题,它提供了敏感度分析和蒙特卡罗分析。敏感度分析可以计算在误差范围中的最大值和最小值对最终结果的影响,由此可以选出对结果影响较大的误差,即比较敏感的误差。蒙特卡罗分析是误差值按一定的分布随机取值,设置产生模拟的个数,通过大量模拟可以得到最后像的偏移量的分布情况。

对图4中Zemax所设计的K镜利用上述两种方法进行误差分析。通过计算得到误差的具体解析式如表1~表4所示(坐标系与Zemax默认坐标系一致)。绕轴的旋转误差是以主光线在每面镜子的入射点(镜面的几何中心)为旋转点计算的。

表1 图4中K镜的位移误差解析式

Table 1 Displacement tolerancing expression of K mirror in Fig.4

Tolerance /mm	KM1	KM2	KM3
Displacement in x -direction(Δx)	0	0	0
Displacement in y -direction(Δy)	$E_{1y} = 1.5\Delta y$	$E_{2y} = -\Delta y$	$E_{3y} = 1.5\Delta y$
Displacement in z -direction(Δz)	$E_{1z} = -0.866\Delta z$	0	$E_{3z} = 0.866\Delta z$

由以上误差解析式可以看出平移误差都是线性的。而旋转误差通过作图(见图6)可以看出在设定的误差范围内,像的偏移量也是线性变化的,即镜面的偏转量越小,像的偏移量也越小。并且在 x 轴和 z 轴的偏转造成的像偏移比 y 轴大。因此在K镜装调时,应尽量使像点轨迹的半径减小。

同样,用Zemax进行敏感度分析和蒙特卡罗分析,根据天文望远镜的精度要求,平移误差范围设定为 $-10 \sim 10 \mu\text{m}$,偏转误差范围设定为 $-5'' \sim 5''$,分析结果见表5。误差分析所选用的标准值是主光线偏离视场中心的距离,这可以通过设定评价函数来作为标准值,评价函数中利用操作数“REAX”、“REAY”和“QSUM”组合完成。KM1与KM3在 z 坐标轴上的平移可以转化为镜子厚度的变化,所以用操作数“TTHI”代替,在 y 轴上的平移用操作数“TEDY”表示。“TETX”、“TETY”、“TETZ”分别是代表镜子在 x, y, z 方向的偏转。蒙特卡罗的运行次数为10000次,误差统计用正态分布。用Zemax计算单个误差的结果与解析式的结果经过对比,两者基本是吻合的,这样可以用解析式来验证Zemax的分析结果。

表2 图4中KM1的旋转误差解析式

Table 2 Rotation tolerancing expression of KM1 in Fig.4

Rotation	Displacement of chief ray on image plane
Rotation around x-axis (ε_x)	$E_{1y} \approx \frac{259.8 \tan(60^\circ + 2\varepsilon_x) - 450}{3 \tan(60^\circ + 2\varepsilon_x) - 1.732} + \tan 2\varepsilon_x \cdot \left[575 + \frac{150 \tan(60^\circ + 2\varepsilon_x) - 433}{2 \tan(60^\circ + 2\varepsilon_x) - 0.58} \right]$
Rotation around y-axis (ε_y)	$E_{1x} \approx \frac{75 \sin 2\varepsilon_y}{1.5 \cos \varepsilon_y + 0.5 \cos^2 \varepsilon_y - 1} + \frac{\sin 2\varepsilon_y \cdot \left(\frac{112.5 \cos \varepsilon_y + 112.5 \cos^2 \varepsilon_y - 225}{0.75 \cos \varepsilon_y + 0.25 \cos^2 \varepsilon_y - 0.5} + 500 \right)}{3 \cos \varepsilon_y - \cos^2 \varepsilon_y + 2}$ $E_{1y} \approx \frac{97.4 \cos \varepsilon_y + 97.4 \cos^2 \varepsilon_y - 194.8}{1.5 \cos \varepsilon_y + 0.5 \cos^2 \varepsilon_y - 1} + 216.5$ $E_{1y} \approx \frac{97.4 \cos \varepsilon_y + 97.4 \cos^2 \varepsilon_y - 194.8}{1.5 \cos \varepsilon_y + 0.5 \cos^2 \varepsilon_y - 1} + 216.5$ $E_{1y} \approx \frac{97.4 \cos \varepsilon_y + 97.4 \cos^2 \varepsilon_y - 194.8}{0.75 \cos \varepsilon_y - 0.25 \cos^2 \varepsilon_y + 0.5} \cdot (\cos \varepsilon_y + \cos^2 \varepsilon_y - 2)$
Rotation around z-axis (ε_z)	$E_{1x} \approx \frac{259.8 \sin \varepsilon_z}{1.5 \cos \varepsilon_z - 0.5} + \frac{400.3 \sin \varepsilon_z}{0.75 \cos \varepsilon_z + 0.25}$ $E_{1y} \approx \frac{259.8(\cos \varepsilon_z - 1)}{3 \cos \varepsilon_z - 1} + \frac{800.8(\cos \varepsilon_z - 1)}{3 \cos \varepsilon_z + 1}$

表3 图4中KM2的旋转误差解析式

Table 3 Rotation tolerancing expression of KM2 in Fig.4

Rotation	Displacement of chief ray on image plane
Rotation around x-axis (ε_x)	$E_{2y} \approx \frac{75 \cos(4\varepsilon_x - 90^\circ) + 500 \cos(4\varepsilon_x - 30^\circ) - 129.9 \sin(4\varepsilon_x - 90^\circ) - 562.92}{\sin(4\varepsilon_x - 30^\circ) - 0.5}$
Rotation around y-axis (ε_y)	0
Rotation around z-axis (ε_z)	$E_{2x} \approx -\frac{\sin 2\varepsilon_z \cdot (779.4 \sin^2 2\varepsilon_z - 2987.7 \cos 2\varepsilon_z + 736.1)}{(3 \sin^2 2\varepsilon_z - 2)(3 \cos 2\varepsilon_z - 1)}$ $E_{2y} \approx \frac{64.95 \cdot \cos 2\varepsilon_z - 64.95}{1.5 \cos 2\varepsilon_z - 0.5} - \frac{1.732 \sin^2 \varepsilon_z \cdot \left(\frac{75}{1.5 \cos^2 \varepsilon_z - 0.5} - 575 \right)}{3 \sin^2 2\varepsilon_z - 2}$

表4 图4中KM3的旋转误差解析式

Table 4 Rotation tolerancing expression of KM3 in Fig.4

Rotation	Displacement of chief ray on image plane
Rotation around x-axis (ε_x)	$E_{3y} = 500 \tan 2\varepsilon_x$
Rotation around y-axis (ε_y)	$E_{3x} \approx \frac{125 \sin 2\varepsilon_y - 750 \sin \varepsilon_y}{1.5 \cos \varepsilon_y - 0.5 \cos^2 \varepsilon_y + 1}$ $E_{3y} \approx \frac{433(\cos \varepsilon_y - 1)}{1.5 \cos \varepsilon_y - 0.5 \cos^2 \varepsilon_y + 1}$
Rotation around z-axis (ε_z)	$E_{3x} \approx \frac{433 \sin \varepsilon_z \cdot (1.5 \cos \varepsilon_z - 0.5)}{0.75 \cos \varepsilon_z + 0.25}$ $E_{3y} \approx \frac{433(\cos \varepsilon_z - 1)(1.5 \cos \varepsilon_z + 1)}{0.75 \cos \varepsilon_z + 0.25}$

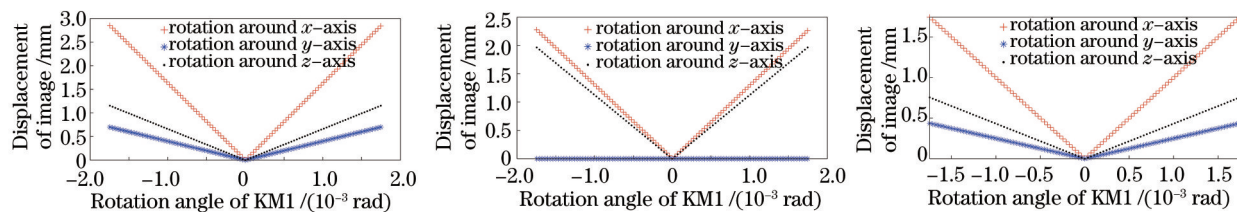


图6 镜面偏转角度与像偏移量的关系

Fig.6 Relationship between the rotation of mirrors and the image movement

表 5 Zemax 误差分析结果

Table 5 Tolerancing result of K mirror in Zemax

Sensitivity analysis:						
Type	Surface Number	Minimum			Maximum	
		Value	Criterion	Value	Criterion	
TTHI	3	7	-0.01000000	0.00867082	0.01000000	0.00864969
TEDY	4	6	-0.01000000	0.01498943	0.01000000	0.01501057
TEDY	8	10	-0.01000000	0.01001057	0.01000000	0.00998943
TTHI	11	14	-0.01000000	0.00864969	0.01000000	0.00867082
TEDY	12	14	-0.01000000	0.01498943	0.01000000	0.01501057
TETY	4	6	-0.00138900	0.00969705	0.00138900	0.00969705
TETZ	4	6	-0.00138900	0.01679578	0.00138900	0.01679578
TETX	5	5	-0.00138900	0.03879875	0.00138900	0.03877762
TETY	8	10	-0.00138900	1.0568E-005	0.00138900	1.0568E-005
TETZ	8	10	-0.00138900	0.02729314	0.00138900	0.02729314
TETX	9	9	-0.00138900	0.03150483	0.00138900	0.03152597
TETY	12	14	-0.00138900	0.00606066	0.00138900	0.00606066
TETZ	12	14	-0.00138900	0.01049737	0.00138900	0.01049737
TETX	13	13	-0.00138900	0.02425318	0.00138900	0.02423205

Monte Carlo analysis:

Number of trails: 10000

Initial statistics: normal distribution

Nominal: 1.0568×10^{-5}

Mean: 0.02746723

Std Dev: 0.01515418

98% > 0.0643296790% > 0.04835819 80% > 0.03960656

50% > 0.0252503420% > 0.0141371810% > 0.00978158 2% > 0.00400918

从敏感度分析的结果可以看出K镜的三面镜子在x轴和z轴的偏转造成的误差较大,这与图6所示的结果一致。从蒙特卡罗分析中可以得知,有些在叠加之后会加大最后的误差结果,98%的偏差是在64.330 μm以内,最大的像偏移能达到103.018 μm左右。从结果可知,K镜装调精度要求很高。为了消旋精度满足最后在CCD的像移达到2个像元大小的要求,可以有三种方法:1) 不断提高K镜机械结构的调节精度;2) 在K镜与CCD之间添加一些缩小成像的准直透镜;3) K镜后放置补偿镜子摆动的摆镜。

表6分别在不同误差范围,给出概率为90%以内的像移情况。从表6可以看出,当不改变偏转误差的范围,并且不断增大平移误差的范围,最终的像移几乎是线性增大的。当减小偏转误差的范围,与改变平移误差相比,它可以使像移量大大减小。所以K镜精度的提高主要是在K镜镜面角度的装调精度。

表 6 误差范围对像移的影响

Table 6 Different error ranges impact on image

Error range		Displacement of image
	0"	0.01920327 mm
Error range of rotation	-3"~3"	0.03272405 mm
(error range of displacement is	-5"~5"	0.04835819 mm
-10~10μm)	-7"~7"	0.06544065 mm
	-10"~10"	0.08818979 mm
	0 μm	0.04442697 mm
Error range of displacement	-5~5 μm	0.04531713 mm
(error range of rotation is -5"~5")	-10~10 μm	0.04835819 mm
	-15~15 μm	0.05223649 mm
	-20~20 μm	0.05741672 mm

5 结 论

消旋 K 镜具有类似于棱镜的性质,但 K 镜优于棱镜的方面是避免对入射光的像散作用。通过类比于 Dove 棱镜,用矩阵方法和类似于棱镜的方法分析 K 镜的消旋原理和光学特性。消旋 K 镜需要满足一定的角度约束条件,并且满足望远镜光轴、K 镜光轴和 K 镜旋转轴共线的情况下才具有消旋的作用。K 镜的具体设计需要根据不同望远镜的光路要求有针对性地设计,比如望远镜的视场、K 镜所在光路的位置、接收器的位置。从加工、装调方面来看,对称式 K 镜要优于非对称式 K 镜。理论分析并结合 Zemax 能够很好地完成 K 镜的光学设计和误差分析的工作,以指导之后的 K 镜加工与装调。

参 考 文 献

- 1 Ju Qinghua. Study on Field Rotation of 1.2 m Alt-Az Telescope and Elimination of Image-Rotation[D]. Yunnan: Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2008: 40-48.
鞠青华. 1.2米地平式望远镜视场旋转研究与消旋[D]. 云南: 中国科学院云南天文台, 2008: 40-48.
- 2 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.
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.
- 3 Zeng Xiangping, 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.
- 4 Wang Ting. Study on the Despun Control System of the Airborne CCD Image[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004: 2-11.
王 霆. 机载 CCD 图像消旋控制技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004: 2-11.
- 5 Cheng Jingquan. The Principles of Astronomical Telescope Design[M]. New York: Springer, 2009: 141-151.
- 6 DSL Durie. A compact derotator design[J]. Optical Engineering, 1974, 13(1): 19-22.
- 7 Smith W. Modern Optical Engineering[M]. New York: McGraw-Hill Companies, 2008: 138-139.
- 8 Mark de Koe. A Design Study of a Cryogenic High Accurate Derotator[D]. Delft: Delft University of Technology, 2013: 9-31.
- 9 Tibor Agocs. Derotators at the WHT[R]. Isaac Newton Group of Telescopes, 2010: 5-14.
- 10 Bauman B, Gavel D. Beam Transfer Optics Preliminary Design Report[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 2001: 13-15.
- 11 Mao Wenwei. Optical Engineering Fundamentals(Part One)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 93-116.
毛文伟. 光学工程基础(一)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 93-116.
- 12 De Bruin J, Johnson D. Line-of-sight reference frames: a unified approach to plane-mirror optical kinematics[C]. SPIE(1697): 111-129.
- 13 Polasek J. Matrix analysis of gimballed mirror and prism system[J]. Optical Society of America, 1967, 57(10): 1193-1201.
- 14 H Z Sar-EI. Revised dove prism formulas[J]. Optical Society of America, 1991, 30(4): 375-376.
- 15 Miles J Padgett, J Paul Lesso. Dove prisms and polarized light[J]. Modern Optics, 1999, 46(2): 175-179.
- 16 Mirzaei S, Abo-Namous O, Beichert G, *et al.*. Developing a new generation of optomechanical derotator for analysis of the dynamic behaviour of rotating components[J]. Advances in Optomechanics, 2009, 7424: 1-9.
- 17 ZEMAX Optical Design Program User's Manual[M]. ZEMAX Development Corporation, 2011: 18-183.
- 18 Guo Peng. Study of Telescope's Derotation System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 12-58.
郭 鹏. 望远镜消旋研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013: 12-58.

栏目编辑: 韩 峰