

引用格式: Xinqiqige, CHEN Yi, JI Hangxin, et al. Opto-mechanical Structure Design and Intelligent Error Allocation of K-mirror Derotator[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3):0322002

新其其格, 陈忆, 季杭馨, 等. K 镜光机结构优化设计与智能误差分配[J]. 光子学报, 2022, 51(3):0322002

K 镜光机结构优化设计与智能误差分配

新其其格^{1,2,3}, 陈忆^{1,2}, 季杭馨^{1,2}, 王磊^{1,2}, 朱永田^{1,2}, 张凯^{1,2}, 章华涛^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 南京 210042)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以 K 镜消旋系统为例, 针对光机结构中多误差源耦合和误差分配的问题, 采用蒙特卡洛算法进行误差分解, 并提出了类粒子群优化算法, 对误差源进行智能误差分配, 以指导工程化的加工公差分配和结构优化极限。首先, 对一套悬臂式 K 镜消旋系统的光机结构引起的消旋指向精度进行误差来源分析; 然后, 通过蒙特卡洛算法结合粒子群优化方法对误差源进行智能分配, 指导 K 镜关键零部件的优化设计和公差分配; 最后, 分别利用光机耦合仿真分析法和实验装调法对设计的 K 镜消旋系统进行消旋指向精度分析。结果显示, 仿真分析获得消旋指向精度为 6.95", 实验装调最优消旋指向精度为 14.24", 验证了光机结构设计及其误差分配方案的可行性。

关键词:误差分配; 光机结构; 消旋系统; 耦合分析; 蒙特卡洛; 类粒子群优化; K 镜

中图分类号: P111

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225103.0322002

0 引言

地平式天文望远镜中存在多面反射镜, 当望远镜跟踪目标时, 望远镜光路中的反射镜间相对转动产生像方视场旋转, 同时由于地球自转引起物方视场旋转, 因此, 在地平式望远镜中独立配置了消旋系统以补偿像旋对成像产生的影响^[1]。常见的消旋法有: 物理消旋、电子消旋和光学消旋。其中使耐焦后的系统整体旋转的物理消旋方案, 由于无法实现在消旋系统后同时加装多个终端仪器, 其应用受限; 电子消旋则因为需要信号传递, 会引起的数据误差和延时性^[2]; 而光学消旋是在系统光路中添加光学部件, 使其与望远镜中的反射镜同步周期性运动来完成消旋, 具有“非接触”、“实时”、“全场”等特点, 消旋器件可以放置于成像元件前任意位置, 安装接口充足的情况下, 可在多个光学平台上通用^[3], 是目前应用最广泛的消旋方案。

按照使用的光学元件类型, 光学消旋可以分为折射式和反射式两种^[3]。折射式消旋系统常用的光学棱镜一般为道威棱镜和别汉棱镜, 其优点体现在棱镜为整体, 各个反射面间的相对位姿可保持不变。随着望远镜口径的增大, 棱镜的线性尺寸也不断增加, 现有的光学材料已经无法满足需求, 同时受光学材料的限制, 光线的全波段透射率并不能达到要求, 并且存在色散现象, 进而导致能量损失。反射式消旋系统则由三块平面反射镜组成, 其能量损失小, 适用于全波段范围。综上所述, 多数地基大口径望远镜均采用反射式光学消旋系统, 例如大口径望远镜大型双筒望远镜(Large Binocular Telescope, LBT)、胡克望远镜(Hooker Telescope)、詹姆斯·克拉克·麦克斯韦望远镜(The James Clerk Maxwell Telescope, JCMT)均采用反射式消旋。

国内外对光学消旋的光机设计、误差分析和消旋控制方面已有很多研究。意大利帕多瓦天文台研究人

基金项目:国家自然科学基金面上项目(Nos.11773047, 11973068), 中科院“一带一路”科技合作专项项目(No.114A32KYSB20160049), 天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项项目

第一作者:新其其格(1991—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为精密光机仪器光机结构设计与分析。Email: xinqiqige@niaot.ac.cn

导师(通讯作者):陈忆(1964—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要研究方向为天文望远镜及终端仪器设备的机械结构设计。Email: ychen@niaot.ac.cn

朱永田(1964—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为天文光谱仪与高分辨成像技术、太阳系外行星探测技术等。Email: ytzhu@niaot.ac.cn

收稿日期:2021-09-01; **录用日期:**2021-10-15

<http://www.photon.ac.cn>

员就 LINC NIRVANA 上的两个 K 镜的具体情况对消旋系统进行了提高刚性的结构设计并研究了轴承安装对消旋精度的影响^[4]; 日本研究人员就斯巴鲁望远镜 AO188 系统安装的消旋系统的实时和精确跟踪控制方案进行了进一步的研究^[5]; 土耳其研究人员对 DAG (Dogu Anadolu Gozlemevi) 放置在 Nasmyth 平台的自适应光学仪器的消旋系统进行了加强刚性的设计并分析了其结构变形对仪器性能的影响^[6]。国内中科院长春光机所对消旋系统支撑结构的设计和控制系统进行了研究和装调实验^[7-11]; 国家天文台、云南天文台就消旋机构的理论误差分析和光学系统的设计以及在天文望远镜上的应用进行了研究^[12-13]。

在国内外相关研究中都提出了消旋的精确度由 K 镜光机结构的多个组件(机械旋转不完善, 内部对齐不完善, 旋转过程中的弯曲)之间的误差耦合决定, 在这种情况下, 对各组件的误差分配要求严格控制。本文从光机结构设计和光机耦合分析出发, 对误差的智能优化分配^[14-15]进行了研究, 应用蒙特卡洛算法^[16-17]结合类粒子群优化算法^[18]进行智能优化; 就 4M 级地平式望远镜上一套 K 镜消旋机构进行了优化设计, 并对影响消旋机构消旋指向精度的误差源以及工程化过程中的公差分配和零部件选型进行了研究; 以 K 镜消旋指向精度为前提, 进行了装调实验, 以验证光机结构设计 with 误差分配的有效性 with 准确性。

1 消旋系统理论模型

1.1 反射式消旋系统工作原理

望远镜跟踪过程中, 反射式消旋系统作为随动系统始终保持转速为像旋速度的一半, 达到其消旋功能。最常用的反射式消旋系统由三块反射镜面呈“K”字型排列组成, 分别为 KM1, KM2, KM3, 其分布方式如图 1 所示。其中 KM1 与 KM3 互为 120° 夹角, 同时分别与望远镜主光轴成 30° 和 150° 夹角; KM2 工作镜面法线垂直于望远镜主光轴。

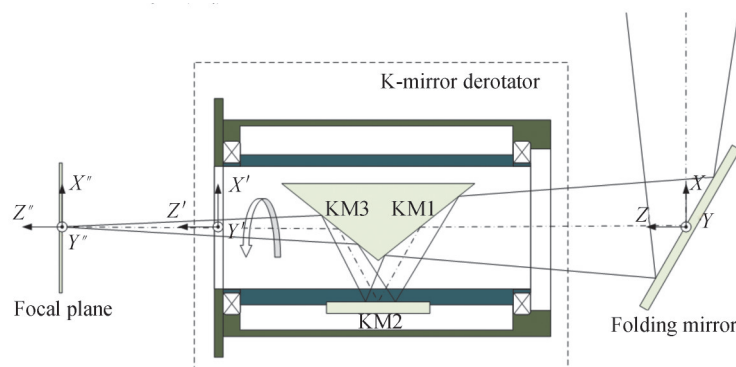


图 1 消旋系统(K 镜)光机简图

Fig.1 Opto-mechanical schematic diagram of derotator(K-mirror)

设 $OXYZ$ 为消旋系统入射光轴的坐标系, 即望远镜主光轴坐标系, 该坐标系为原始静坐标系。设 $O''X''Y''Z''$ 为消旋系统出射光路坐标系, 该坐标系为焦面坐标系。设 $O'X'Y'Z'$ 为 K 镜机械旋转坐标系, 即动坐标系。消旋过程中, 动坐标系相对原始静坐标系沿 Z' 轴(机械旋转轴)旋转, 在焦面坐标系上达到消旋的目的。由反射镜变换公式可求得 K 镜的总体作用矩阵 R_K , 即

$$R_K = R_{K3} \cdot R_{K2} \cdot R_{K1} \quad (1)$$

式中, R_{K1} 、 R_{K2} 、 R_{K3} 分别为反射镜 KM1、KM2、KM3 的反射作用矩阵, 有

$$R_j = \begin{bmatrix} 1 - 2N_{xj}^2 & -2N_{xj}N_{yj} & -2N_{xj}N_{zj} \\ -2N_{xj}N_{yj} & 1 - 2N_{yj}^2 & -2N_{yj}N_{zj} \\ -2N_{xj}N_{zj} & -2N_{yj}N_{zj} & 1 - 2N_{zj}^2 \end{bmatrix} \quad j = K1, K2, K3 \quad (2)$$

式中, $N_j = [N_{xj} \ N_{yj} \ N_{zj}]$ 为反射镜面 KM1、KM2、KM3 的单位法线矢量, 根据 K 镜的光学结构设计方案, 单位法线矢量分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{N}_{K1} = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 \\ 0 \\ -\sin \beta_1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{N}_{K2} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{N}_{K3} = \begin{bmatrix} \cos \beta_3 \\ 0 \\ -\sin \beta_3 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中, β_1 和 β_3 分别为反射镜KM1和KM3的法向矢量与入射光线方向(即Z轴方向)所呈夹角。

当望远镜跟踪目标时,望远镜主光线 A_0 旋转 θ 得到入射光线 $A = S_\theta A_0$ 时,K镜相应的旋转 $\theta/2$,则出射光线 A' 可表示为

$$A' = S_\theta R_{K\frac{\theta}{2}} A \quad (4)$$

式中, S 为K镜的旋转变换矩阵,有

$$S_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

设原始入射光线 $A = [0 \ 0 \ 1]$,带入式(4),可得出射光线 $A' = [0 \ 0 \ 1]$,即达到消旋功能。

1.2 K镜消旋指向精度数学模型

基于K镜消旋机构的工作原理,影响消旋指向精度的主要因素有:1)K镜机械旋转轴 Z' 与原始静坐标系 Z 不重合;2)K镜反射镜KM1、KM2、KM3的单位法线矢量变化。根据K镜光机结构设计方案(图1),引起单位法向矢量改变的误差源有:1)镜筒内部的光学镜面误差;2)KM1和KM3的光学加工和安装误差,KM2的装调误差;3)K镜光机结构的整体弹性变形。引起K镜机械旋转轴与光轴不重合的误差源有:1)轴承选型与安装误差;2)内外镜筒加工与安装误差。

误差源中随内镜筒运动的部件将会引入周期性改变的动态误差,从原理式(4)出发,影响反射镜面单位法向矢量,其具体影响数学模型为

$$\mathbf{N}_{Ki}' = \mathbf{M}_{IK} (\mathbf{M}_{Ki} \cdot \mathbf{M}_{F-Ki}(\theta) \cdot \mathbf{N}_{Ki} + T_{Ki} + T_{F-Ki}(\theta)) + T_{IK}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中, \mathbf{M}_{Ki} , T_{Ki} 为K镜反射镜的旋转和平移误差,该误差由主镜的加工误差决定; \mathbf{M}_{IK} , T_{IK} 为K镜内镜筒部件整个结构的旋转和平移误差,该误差由K镜内镜筒、轴承内圈的形位误差和尺寸误差引起; $\mathbf{M}_{F-Ki}(\theta)$, $T_{F-Ki}(\theta)$ 为K镜结构变形引起的反射镜位姿的广义变化函数,因K镜结构的不均匀性导致其广义变化函数为K镜内圈相对旋转角度 θ 的周期变化函数,具体变化幅值与相位由各光学元件的支撑方式决定。

将式(6)代入反射作用式(2)中,得到含有误差的反射作用矩阵 \mathbf{R}_K' ,将其代入消旋式(4),得到消旋后的出射光线为

$$A'' = \mathbf{M}_{O-K} S_\theta^{-1} \mathbf{R}_K' A + T_{O-K} \quad (7)$$

式中, \mathbf{M}_{O-K} , T_{O-K} 分别为K镜整体旋转变换引起的机械旋转轴角度误差和平移误差,该误差来源为轴承外圈形位误差、K镜外镜筒形位误差和尺寸误差。得到广义出射光线为

$$A'' = \begin{bmatrix} X\left(\frac{\theta}{2}\right) + X_1 \\ Y\left(\frac{\theta}{2}\right) + Y_1 \\ Z\left(\frac{\theta}{2}\right) + Z_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, X_1 、 Y_1 、 Z_1 分别为出射光线单位向量中的误差分量。

消旋指向精度通过焦面上形成的图形半径来判定,根据向量与平面交点求解公式,得到其在焦面上周期旋转形成的交点和最大误差半径为

$$\left\{ \begin{array}{l} x_i = \left(\frac{f_l - Z_i}{Z\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right) \cdot X\left(\frac{\theta}{2}\right) + X_i \\ y_i = \left(\frac{f_l - Z_i}{Z\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right) \cdot Y\left(\frac{\theta}{2}\right) + Y_i \\ \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \\ h = \max\left(\sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}\right) \end{array} \right. \quad (9)$$

式中, f_l 为望远镜 M3 镜到焦面的距离; h 表示消旋机构 N 次旋转一周后焦面图形中图形的最大占用半径。

2 K 镜消旋指向精度智能优化分配

2.1 消旋系统光机结构设计及其误差源分析

基于 K 镜消旋系统的工作原理可知,消旋系统由三块反射镜排列成“K”字型。设计的 K 镜消旋系统安装于望远镜叉臂上,通光口径为 75 mm,其主光轴沿水平方向。在光学元件的选择中,考虑到棱镜消旋系统工作面相对稳定和保持工作面面型的优势,最终选用三棱柱棱镜来保证 KM1、KM3 的工作反射面, KM2 选用 20 mm 厚的圆形反射镜。为保证光学元件的刚性,并得到优质反射效果,反射镜材料选用微晶玻璃,反射面均镀宽波段高效率的金属介质膜。

消旋机构三维模型如图 2 所示,在光学元件的支撑结构设计中, KM2 为单独的圆形反射镜,选用背部三点柔性支撑,其中柔性材料选用不锈钢 403,以钢钢块为垫块与反射镜背部粘接,柔性支撑连接到 KM2 基底结构上,其基底结构进行柔性微调设计,可调节 KM2 的位姿。组成 KM1、KM3 的棱镜则选用钢钢垫块与基板连接,通过调节钢钢块厚度、斜率来调整其位姿。为达到消旋机构的旋转机能,基板与基底结构均固连到内镜筒上,通过两端角接触球轴承与外筒连接,由电机直驱完成内筒相对外筒的旋转。其中,外筒一端与望远镜叉臂相连,承悬臂状态。

根据消旋系统的工作原理与光机结构设计方案,影响 K 镜消旋系统指向度的主要因素有 KM1、KM2、KM3 的相对位姿和 K 镜总装的机械旋转轴与主光轴的偏移与角度。

设计的 K 镜消旋机构中不可调节的结构设计误差源如表 1 所示,其中系统误差随消旋系统的旋转呈现周期性变化,随机误差则在误差范围内随机出现,呈抖动状态。

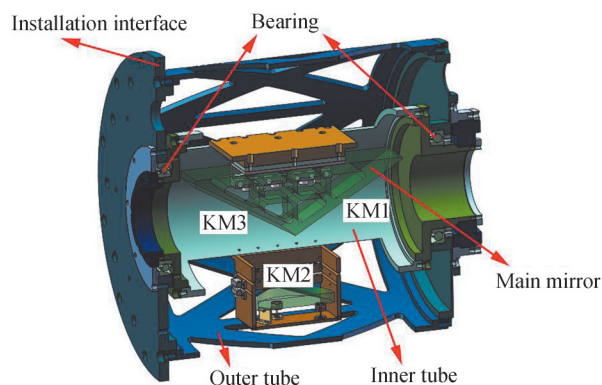


图 2 K 镜光机结构设计方案
Fig.2 Opto-mechanical structure design of K-mirror

表1 K镜消旋机构误差源
Table 1 Error sources of K-mirror derotator

Item	Error sources
System error	Main mirror processing error (KM1, KM3 pose error)
	Elastic deformation error
	Machining error and installation error of endoscope tube
	Machining error and installation error of outer tube
	Bearing selection and installation error
Random error	Outer ring error
	Inner ring error
	Bearing runout error

2.2 基于类粒子群优化算法进行误差分配

运用蒙特卡洛方法简化表1中多个误差源在焦面上的耦合。每个误差源的公差分配从精密级 a_i , 到粗糙级 b_i 内进行选择, 即对于第 i 个误差源, 优化目标为 b_i 的值。在进行光学元件和机械零件加工时, 加工件的尺寸可能性概率在公差范围内满足正态分布, 其中均方根 σ 为误差源的公差分配值。

所以, 误差源 i 的尺寸分布概率 Ψ 为

$$\Psi(x_i) = \int_{-\sigma_i}^{\sigma_i} \varphi(x_i) d\sigma \quad (a_i < 3\sigma_i < b_i) \quad (10)$$

式中, $\varphi(x_i)$ 为第 i 个误差源在误差范围内数值出现的概率密度函数。

由消旋系统消旋指向精度的判定方式(如式(9))所求得的消旋出射光 A^n 旋转一周在焦面上产生图形的位移偏差。设其中 $h_j < 2000 \text{ mm} \times \tan(20'')$ 发生的概率为

$$\gamma_j = \sum_{i=1}^n \omega_i \Psi(x_i) \quad (11)$$

式中, ω_i 为各个误差源的影响因子, 且 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。

基于类粒子群优化方法, 寻找最优误差分配方案。其优化目标为 b_i , 保证 γ_j 发生的概率为 95% 以上, 且取最大 b_i 的值, 其中多个误差源的优化顺序由灵敏度因子 S 、加工难易程度 C_1 与经济性影响因子 C_2 来确定。

加工难易程度 C_1 与加工成本 C_2 都以指数形式增加, 在这一部分的判断因子为

$$E_i = \sum_{j=1}^D e^{C_{j1} + C_{j2}}, \quad j = 1, 2, \dots, D \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

式中, C_{j1} 、 C_{j2} 分别表示第 j 个误差源的加工难易等级和加工成本等级, D 为误差源个数, N 为总优化步数。

另一优化选择判断路径为误差的灵敏度因子 S , 即

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_D) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

假设一个 D 维的误差源搜索空间, 每个误差源都从粗糙级到精密级设定上下限值, 设立 N 个粒子组成一个群落, 其初始值均取上限, 在第一次迭代优化以后出现粒子差异性, 其中第 i 个粒子表示为一个 D 维的向量 X_i 。

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

第 i 个粒子的“飞行”速度也是一个 D 维的向量 V_i , 记为

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置称为个体极值, 其判定标准为粒子群中最小 E_i , 此时的最优值记为

$$P_{\text{best}} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置称为全局极值, 其判断标准为双标准, 即在满足指向性的条件下的最小 E_i , 记为

$$G_{\text{best}} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

在寻找这两个最优解时, 粒子根据式(18)和(19)来更新自己的速度和位置, 即

$$v_{ij} = \omega v_{ij} + c_1 e^s d_j r e^{(\rho_{ij} - x_{ij})} + c_2 e^s d_j r e^{(\rho_{ij} - x_{ij})} \quad (18)$$

$$x_{id} = x_{id} - v_{id} \tag{19}$$

式中, w 为权重因子, c_1, c_2 为学习因子, s_j 为灵敏度因子 $S = (s_1, s_2, \dots, s_D)$ 中相对应的元素, d_j 为每个误差源的公差辨识精度, r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数, 在指向精度未达到目标值时 $p_{ij} = p_{kj} = x_{ij}$ 。

根据优化路径经过数次迭代, 蒙特卡洛算法计算合格率和焦面最大消旋指向精度的迭代优化如图 3 所示, 由图可知在第 8 次迭代时收敛。

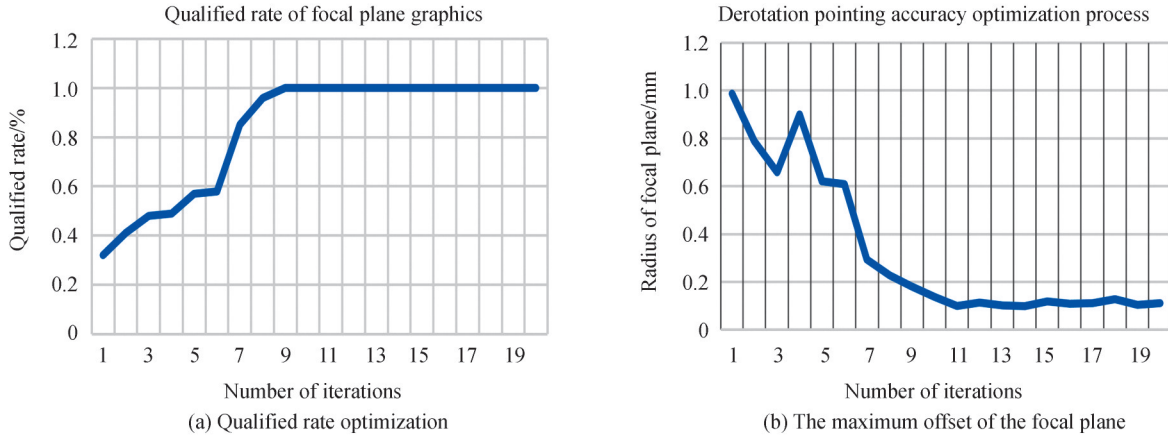


图 3 优化迭代收敛图

Fig.3 Optimize iterative convergence graph

采用类粒子群优化的结果有多种排列组合方式, 考虑满足偏移小、加工成本低、需要调节量少等多因素取值, 最终优化结果如表 2 所示。表 2 中的次误差源为主误差源引入的影响指向精度的自由度, 其中, T_z 、

表 2 关键零部件误差分配优化结果

Table 2 Optimization results of key component error distribution

Main error source	Sub-error source	Error distribution	
Elastic deformation error	KM1 pose error	T_z /mm	0.044 7
		R_x /rad	0.000 137
		R_y /mm	0.000 225
	KM2 pose error	T_z /mm	0.079 1
		R_x /rad	0.000 05
		R_y /rad	0.000 4
	KM3 pose error	T_z /mm	0.049 0
		R_x /rad	0.000 167
		R_y /rad	0.000 05
Main mirror processing error	θ_1 /($^\circ$)	0.008 42	
	θ_2 /($^\circ$)	0.010 3	
	θ_3 /($^\circ$)	0.005	
Bearing bus inclination error	E1/mm	0.005	
	$(X_1 + X_2)/2$ /mm	0.005	
Bearing coaxiality error	$(Y_1 + Y_2)/2$ /mm	0.009 32	
	$(X_1 - X_2)/2$ /rad	0.000 5	
	$(Y_1 - Y_2)/2$ /rad	0.003 91	
Lens barrel error	Inner tube error	I_{Rx} /($^\circ$)	0.029 5
		I_{Ry} /($^\circ$)	0.022 09
	Outer tube error	O_{Rx} /($^\circ$)	0.013 08
		O_{Ry} /($^\circ$)	0.006 54
Qualified rate of focal plane graphics/%		96	
Derotation pointing accuracy		0.18 mm (15.8'')	

R_x 、 R_y 分别表示因弹性变形导致的KM1、KM2、KM3沿Z轴的平移和沿X和Y轴的旋转; θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别为主镜加工中KM1和KM3两个表面沿X、Y、Z轴偏转的夹角误差; $(X_1+X_2)/2$ 、 $(Y_1+Y_2)/2$ 、 $(X_1-X_2)/2$ 、 $(Y_1-Y_2)/2$ 为依据消旋系统左右两个轴承的安装中心位置坐标 $(X_1 \ Y_1 \ Z_1)$ 与 $(X_2 \ Y_2 \ Z_2)$,计算得到的内镜筒相对外镜筒的安装偏差; I_{Rx} 、 I_{Ry} 分别为内镜筒中心轴在X和Y轴方向产生的加工角度误差; O_{Rx} 、 O_{Ry} 分别为外镜筒中心轴在X和Y轴方向产生的加工角度误差。其公差范围相对经验取值法,在结构优化设计与加工精度上可相应放宽数值范围。

3 优化结果验证

根据表2所示的关键零部件误差分配方案,将表中的次误差源换算到关键零部件尺寸与形位公差上,选择相应的型号及其加工尺寸公差如表3所示。

表3 关键零部件公差等级与轴承型号的选择
Table 3 Selection of tolerance grades of key components and bearing models

Key components	Selection and tolerance level	Tolerance range		
		Tolerance position	Tolerance	
Bearing	Bearing type :FAG 71934C Precision level: P4	Average inner diameter variation	0.005 mm	
		Average outer diameter variation	0.006 mm	
		Width variation	0.005 mm	
		Radial runout of inner ring of complete bearing	0.006 mm	
		Radial runout of outer ring of complete bearing	0.01 mm	
		Bearing bus inclination error	0.007 mm	
Inner tube	Central axis perpendicularity tolerance level: 8	Size: 544 mm	3.2 μ m	
	Coaxiality tolerance level of bearing mating shaft section: 6	70 μ m		
Outer tube	Central axis perpendicularity tolerance level: 7	Size: 230 mm	1.6 μ m	
	Tolerance class of perpendicularity Installation interface: 6	Diameter: 660 mm	80 μ m	
	Coaxiality tolerance level of bearing mating shaft section: 6	80 μ m		
Elastic deformation	Structure optimization of inner and outer tube and main mirror	Maximum deformation of structure	0.008 8 mm	
Main mirror	Inclination tolerance level: 5	Surface size	Length: 260 mm	0.007 05°
			Width: 160 mm	0.008 95°

3.1 光机耦合分析验证

对于如K镜的多个光学元件组成的光机系统,对其进行仿真分析时,应用MATLAB建立统一的仿真模型,连接光机结构的有限元仿真软件与光线追迹软件进行光机耦合分析。验证结果由光学系统的精度表示。

根据K镜消旋系统的误差源分析,光机结构在工作过程中的弹性变形会引起反射镜位姿变化,在光机耦合分析中,首先对K镜进行有限元分析。由于K镜进行消旋工作时,内镜筒部件相对外镜筒发生旋转,从而光学元件在空间中的位置发生改变,受重力场影响,各反射镜在不同工作位置表现出不同的受力变形状态,因此需要对K镜处于不同工作位置时的反射镜位姿变化进行均匀采样,提取其位移和旋转变化量。

有限元分析导入模型如图2所示,结构所用材料参数如表4所示,得到结构变形对K镜反射镜的位姿影响如图4所示,分别为KM1、KM2、KM3的工作面产生的平移偏差和角度偏差的周期变化的采样拟合。

由拟合结果可知,其影响指向性的偏差都随K镜整体旋转角度呈正弦和余弦的模式,其中

表4 K镜光机结构所用材料参数
Table 4 Material parameters of K-mirror

Materials	Density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Young's modulus/ ($\times 10^{10}\text{Pa}$)	Poisson ratio	CTE/ ($\times 10^{-6}\text{C}^{-1}$)	Specific heat capacity/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Thermal conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
Zerodur	2.53	9.06	0.24	0 ± 0.05	821	1.64
Invar	8.05	14.1	0.259	1.26	—	10.4
40Cr	7.9	20~21.17	0.25~0.3	11	460	66.6
65Mn	7.82	19.7	0.282	11.1	—	—
Polytef	2.10~2.30	20.8 (Compression) 70 (Bending)	0.4	1.03~1.28	—	0.256

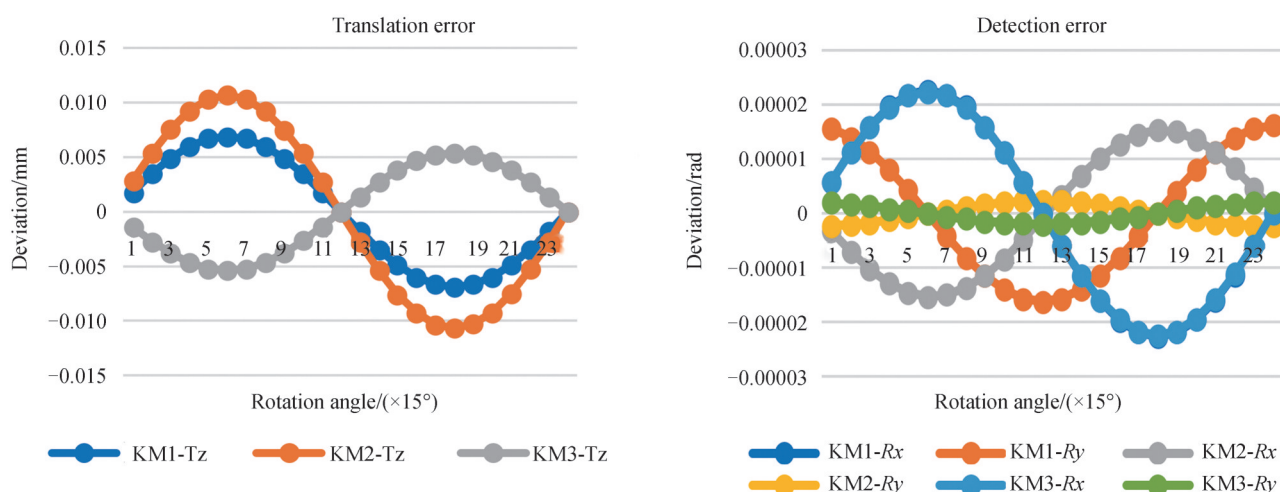


图4 有限元分析得到的KM1、KM2、KM3的位姿周期变化拟合

Fig. 4 Fitting graphs of KM1, KM2, and KM3 pose cycle changes obtained by finite element analysis

$A_{\text{KM1-Tz}}$, $A_{\text{KM1-Rx}}$, $A_{\text{KM1-Ry}}$ 分别代表K镜结构在旋转过程中产生的变形引起的KM1、KM2、KM3在Z方向的平移最大值和沿X、Y轴的旋转最大值,由图4(b)可知,由于KM1和KM3为同一块棱镜上的两个反射面,因此KM1-Rx和KM2-Rx的周期变化图形重合。相应的振幅A均小于表3中的最优结果,分别为 $A_{\text{KM1-Tz}} = 0.0069$, $A_{\text{KM1-Rx}} = 2.26 \times 10^{-5}$, $A_{\text{KM1-Ry}} = 1.62 \times 10^{-5}$, $A_{\text{KM2-Tz}} = 0.0106$, $A_{\text{KM2-Rx}} = 1.53 \times 10^{-5}$, $A_{\text{KM2-Ry}} = 2.33 \times 10^{-6}$, $A_{\text{KM3-Tz}} = 0.0054$, $A_{\text{KM3-Rx}} = 2.26 \times 10^{-5}$, $A_{\text{KM3-Ry}} = 1.96 \times 10^{-6}$ 。

根据式(6)和(7),应用仿真软件建立消旋系统仿真模型,模拟模型焦面位置为从望远镜中转镜开始的距离1.94 m,图4所示的误差对应式(6)中的 $M_{F-Ki}(\theta)$, $T_{F-Ki}(\theta)$ 。将主镜加工产品实际三坐标测量结果和轴承供应商提供的轴承误差带入仿真模型中,轴承选型和内外镜筒加工引入的误差在公差范围内,以100个满足条件的随机误差求得在仿真模型焦面上形成的图形,其中半径最大的图形如图5所示。根据式(20)求得最大指向性偏差角度。

$$\beta = \arctan\left(\frac{r}{d}\right) \quad (20)$$

式中, r 为在焦面上图形的最大直径, d 为焦面距离KM3中心的直线距离, β 为消旋指向精度值。在模拟仿真中 $r = 0.079208 \text{ mm}$, $d = 2350 \text{ mm}$, 代入式(20)得到指向偏差 $\beta = 6.95''$ 。

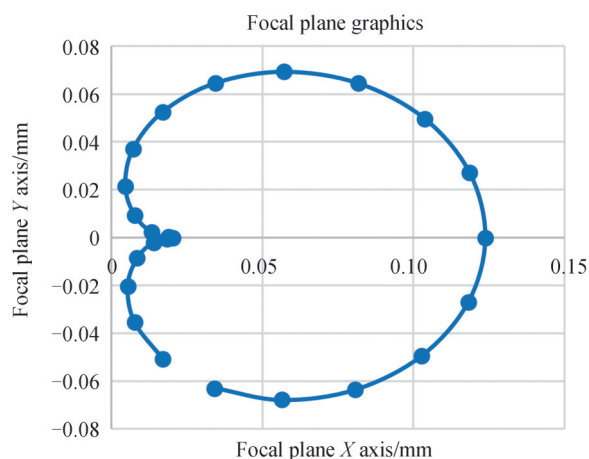


图5 误差仿真分析焦面图形

Fig. 5 Focal plane graphics from error simulation analysis

3.2 实验验证

消旋机构实际装调实验平台如图6所示,在进行装调中,为保证消旋系统的出射光源在探测器内形成的偏移误差来源于消旋机构本身,对入射光源进行光路修正,保证入射光源的指向稳定性。

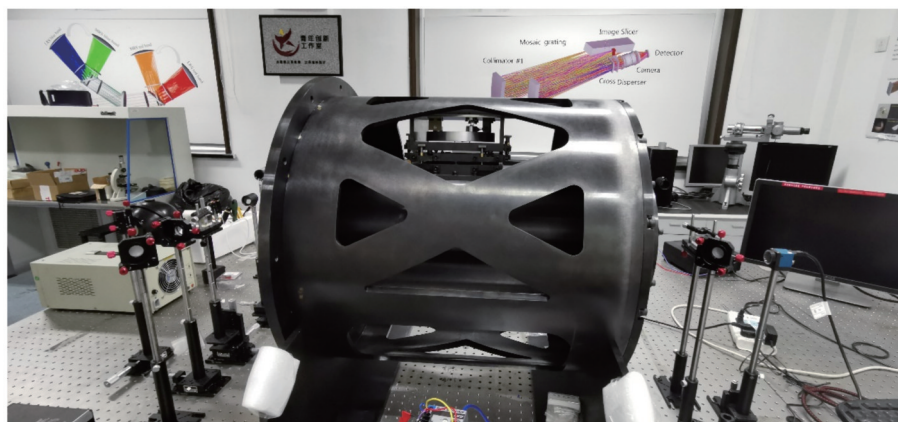


图6 K镜装调实验平台

Fig.6 Experimental bench of K-mirror

在基础装配后,对K镜主镜和KM2子镜进行位姿调整,主要通过改变垫片的尺寸对主镜的倾斜和Y向平移进行调节,对KM2子镜进行Y向调节和倾斜调节,在调解过程中可进行相互补偿。其中,Z向具有安装基准面无需调节。实验室调节状态下得到最优调节结果。调节最优情况下,截取探测器上显示的图形,寻找图形的最小外接圆,得到的探测器图形如图7所示,其最小外接圆半径占像面45个像元(像元大小:5.2 μm),将探测器图形所测得到的图像半径带入式(20)中,得到光经过K镜后产生的消旋指向精度为 $\beta = 14.24''$ 。

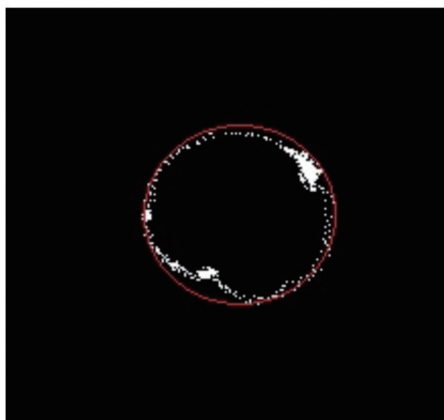


图7 CCD上的图形

Fig.7 Graphics on CCD

仿真验证时,其有限元分析结果小于表2所示的误差分配结果,因此仿真结果小于数值优化得到的指向精度。并且仿真时,假设轴承、内镜筒、外镜筒等关键零部件的安装误差处于理想状态下,因此其仿真误差小于实际装调误差。

4 结论

本文针对地平式天文光谱仪的消旋需求,对一套悬臂式K镜消旋系统进行了优化设计。对光机系统的多误差源影响指向性问题,根据消旋系统工作原理和光机结构设计找到不可调节误差源,并提出了类粒子群优化方法,利用该优化方法对其误差源进行智能优化,得到了可收敛的误差优化分配结果。对最终设计方案和公差分配方案进行了光机耦合误差分析和实验验证,仿真分析结果表明最大消旋指向精度为

6.95",实验调节中探测器显示图形占像面45个像元,即K镜的消旋指向精度为14.24"。提出的基于类粒子群算法结合蒙特卡洛算法的智能优化方法对各误差源进行了合理的公差分配,可为以后智能误差分配高精度光机仪器的误差源、指导工程化的加工公差分配和结构优化极限提供参考。

参考文献

- [1] CHENG Jingquan. The principles of astronomical telescope design[M]. New York: Springer, 2009: 141-151.
- [2] WANG Dai, LI Xiaoyan, WU Qinzhong. 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] RUAN Ping. Design of image-rotation eliminated structure and accuracy analysis[J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(2): 190-192.
阮萍. 一种消像旋转动机构的设计与精度分析[J]. 光子学报, 2000, 29(2): 190-192.
- [4] BRUNELLI A, BERGOMI M, DIMA M, et al. Tips and tricks for aligning an image derotator[C]. SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation, International Society for Optics and Photonics, 2012, 8846: 88464L.
- [5] TARAS G, SHINA O, SEBASTIAM E, et al. Software control and characterization aspects for image derotator of the AO188 system at Subaru[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III, International Society for Optics and Photonics, 2010, 7735: 77353W.
- [6] BAUDET J, JOLISSAINT L, KESKIN O, et al. Design of a derotator for the 4 m DAG telescope [C]. SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation, 2016, 9908: 99085L.
- [7] YIN Y, ALTMANN B, PAPE C, et al. Machine-vision-guided rotation axis alignment for an optomechanical derotator [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121(10): 456-463.
- [8] GUO Peng, ZHANG Jingxu, YANG Fei, et al. Optimum design of support structure for 2 m telescope's K mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1914-1919.
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.
- [9] ZHANG Yan, CHEN Baogang, WANG Liang. Alignment technology of K mirror in large aperture telescope[J]. Optical Technique, 2020, 46(1): 27.
张岩, 陈宝刚, 王亮. 大型望远镜消旋K镜准直技术研究[J]. 光学技术, 2020, 46(1): 27.
- [10] ZHANG Yan, GUO Peng. Research on image field rotation of Alt-az telescope and design of K-mirror[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 36(6): 32-35.
张岩, 郭鹏. 地平式望远镜像旋问题研究及消旋K镜设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(6): 32-35.
- [11] WANG Zhichen, ZHAO Yongzhi, ZHOU Chao. Design of K mirror for Altaz telescope [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(7): 762-765.
王志臣, 赵勇志, 周超. 地平式望远镜消旋K镜的设计[J]. 光子学报, 2012, 41(7): 762-765.
- [12] 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): 0316002.
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): 0316002.
- [13] LIU Guangqian, FU Yu, CHENG Xiangming. Image-field rotation and control of counter rotation for the spectrograph of the 1m solar telescope of the Yunnan observatory [J]. Astronomical Research & Technology-Publications of National Astronomical Observatories of China, 2012, 9(1): 86-92.
柳光乾, 付玉, 程向明. 1米太阳望远镜光谱仪像旋转及消旋控制[J]. 天文研究与技术:国家天文台台刊, 2012, 9(1): 86-92.
- [14] SHI Rong, LIU Jiang. Application of intelligent optimization methods in jamming resource allocation: a review [J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(10): 54-61.
石容, 刘江. 干扰资源分配问题的智能优化应用研究综述[J]. 电光与控制, 2019, 26(10): 54-61.
- [15] XU Lizhi, YAN Changxiang, LI Yi, et al. Image motion calculation and error distribution for aerial whisk-broom imaging [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(10): 2071-2079.
徐力智, 颜昌翔, 李颐, 等. 航空摆扫成像像移计算与误差分配[J]. 光学精密工程, 2019, 27(10): 2071-2079.
- [16] GUO Xu, HU Chunhui, YAN Changxiang, et al. Analysis of sun pointing error of spaceborne solar spectroradiometer based on Monte Carlo method[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(3): 474-483.
郭旭, 胡春晖, 颜昌翔, 等. 基于蒙特卡罗法的星载太阳辐照度光谱仪对日指向误差分析[J]. 光学精密工程, 2021, 29(3): 474-483.
- [17] LIU Rui, TONG Ximeng, TIAN Zhongke. Analysis of repetitive positioning accuracy of unloading manipulator based on Monte Carlo method[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(10): 1112-1116.

- 刘瑞, 全西萌, 田仲可. 基于蒙特卡洛法的卸胎机械手重复定位精度分析[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1112-1116.
- [18] LIU Bo. Particle swarm optimization algorithm and its engineering application[M]. Electronic Industry Press, 2010.
- 刘波. 粒子群优化算法及其工程应用[M]. 电子工业出版社, 2010.

Opto-mechanical Structure Design and Intelligent Error Allocation of K-mirror Derotator

Xinqiqige^{1,2,3}, CHEN Yi^{1,2}, JI Hangxin^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, ZHU Yongtian^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2},
ZHANG Huatao^{1,2}

(1 National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

(2 CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As the accuracy requirements of optical instruments continue to increase, optomechanical design engineers increase the dimensional tolerance requirements of key components when designing the structure, which puts high requirements on the difficulty of processing, and the cost increases accordingly. Therefore, it is a problem that needs to be solved they are meeting the accuracy requirements of optical instruments, in precision instrument engineering to reduce the processing difficulty and cost at the same time. The pointing accuracy during the derotation process is determined by the error coupling between multiple components, and the imperfect mechanical rotation, internal imperfections, and structural deformation during the rotation will cause pointing errors. Taking the K-mirror derotation system equipped with optical astronomical telescopes as an example, in view of the coupling of multiple error sources in the optical-mechanical structure, the error distribution requirements of the optical-mechanical components are strict. The Monte Carlo algorithm is used to decompose the coupling of multiple error sources. At the same time, a particle swarm optimization algorithm is proposed to perform intelligent error distribution on multiple error sources to guide the optimization of tolerance distribution, optimal design and structural parameters of machined parts in the process of optical-mechanical structure engineering. First, according to the working principle of the K mirror derotation system, combined with the K mirror derotation pointing accuracy caused by the optical-mechanical structure, the error source is analyzed, and the mathematical model of the derotation system pointing accuracy is built, in which the rotation figure on the focal plane after derotation decided to determine the derotation pointing accuracy. Find out the error source that affects the pointing accuracy of the derotation, including the matching size of key components and the selection of standard parts. According to the working principle of the retraction system and the design scheme of the optical-mechanical structure, the main factors affecting the directionality of the K mirror retraction system are the relative poses of KM1, KM2, KM3 and the deviation angle between the mechanical rotation axis and the main optical axis of the K mirror assembly. Then the error decoupling is carried out through the Monte Carlo algorithm, the pointing accuracy is the optimization goal, the sensitivity of the error source is the main optimization path judgment factor, and the processing difficulty and cost are the secondary optimization path judgment factors, to establish the optimization model. The quasi-particle swarm optimization method is used for the error source of intelligent allocation. There are multiple permutation and combination methods for the results of the particle swarm optimization, which considers the value of multiple factors such as small offset, low processing cost, and less adjustment required. Through optimization iterations, an allocation plan that meets the accuracy of the instrument while reducing cost and processing difficulty is obtained, and guides the optimization design, selection and processing tolerance allocation of key components in the K-mirror structure design. Finally, the optical-mechanical coupling simulation analysis method and the experimental setup method are used to analyze the derotation pointing accuracy of the designed K mirror derotation system. Among them, the simulation analysis method uses MATLAB to establish a unified simulation model, connects the finite element simulation software of the optical-mechanical structure and the ray tracing software to perform the optical-mechanical coupling

analysis, and the anti-rotation pointing accuracy obtained is $6.95''$. In the experimental setup method, when the adjustment is optimal, the graph displayed on the detector is intercepted, and the smallest circumscribed circle of the graph is found, and the best anti-rotation pointing accuracy is $14.24''$. The feasibility of the optical-mechanical structure design scheme of the derotation system and the intelligent error distribution scheme of the optical-mechanical system is verified.

Key words: Error allocation; Optical-mechanical structure; Racemization system; Coupling analysis; Monte Carlo; Particle swarm optimization; K-mirror

OCIS Codes: 220.4880; 120.4640; 120.4880