

碟式聚光器镜面单元聚焦光斑与位姿误差的关联特性

颜 健¹ 彭佑多¹ 程自然¹ 彭 黎¹ 谭新华²

¹湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201

²湘电集团太阳能事业部, 湖南 湘潭 411101

摘要 为实现碟式聚光器镜面单元调焦的定量指导,需要建立镜面单元空间位姿与聚焦光斑特征的唯一定量对应关系。提出以镜面单元旋转和平移运动的组合等效引入位姿误差,基于光线跟踪方法建立位姿误差工况的聚焦光斑分布模型,引入聚光比阈值来提取聚焦光斑的特征边界,并采用最小二乘法对特征边界进行椭圆拟合,用于表征聚焦光斑的分布特征。分析了太阳直射辐照值、边界提取阈值、镜面单元位姿误差等对聚焦光斑特征的影响。结果表明,镜面单元位姿误差工况不同时,聚焦光斑的椭圆几何特征具有明显可区分性,用于镜面单元位姿反演具有可行性,为镜面单元调焦系统的搭建提供了参考。

关键词 光学设计; 太阳能; 碟式聚光器; 安装误差; 位姿反演; 能流密度分布; 光线跟踪方法

中图分类号 TK513.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1122003

Correlative Characteristics Between Focal Spot of Solar Dish Concentrator Mirror Unit and Posture Error

Yan Jian¹ Peng Youduo¹ Cheng Ziran¹ Peng Li¹ Tan Xinhua²

¹Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

²Solar Business Department, Xiangtan Electric Manufacturing Group Co., Ltd., Xiangtan, Hunan 411101, China

Abstract In order to realize the quantitative guidance for the focusing of dish concentrator mirror unit, it is essential to establish the unique quantitatively corresponding relationship between the mirror unit posture and the focal spot feature. We have presented the equivalent posture error by combining rotation and translation movement of the mirror unit, and the focal spot flux density distribution model under the posture error condition is established based on the ray tracing method. The concentration ratio threshold is applied to extracting the boundary characteristics of the focal spot, and the least-squares method is used for elliptical fitting of the boundary characteristics which represents the distribution characteristics of the focal spot. The factors influencing the focal spot characteristics are analyzed, including the direct normal solar irradiation, concentrator ratio threshold, and mirror unit posture error. The results show that the ellipse geometry of the focal spot under different mirror unit posture error conditions can be obviously distinguished, and it is feasible for the mirror unit posture inversion, which provides reference for the construction of the subsequent mirror unit focusing system.

Key words optical design; solar energy; solar dish concentrator; installation error; posture inversion; flux density distribution; ray tracing method

OCIS codes 220.2740; 080.2740

1 引 言

碟式/斯特林太阳能光热发电系统(DS-CSP)具有光电转换效率高、布置灵活和模块化程度高等特点,是

收稿日期: 2016-05-19; **收到修改稿日期:** 2016-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(51576061)、湖南省自然科学基金(2016JJ2052)、湖南省研究生科研创新项目(CX2016B549)

作者简介: 颜 健(1988—),男,博士研究生,主要从事太阳能光热发电系统光机热多场耦合协同优化方面的研究。

E-mail: yanjiancaoyue@163.com

导师简介: 彭佑多(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事机械系统动力学、新能源技术与装备等方面的研究。

E-mail: ydpeng1964@163.com

太阳能资源高效开发的重要装备之一^[1-3]。DS-CSP 的聚光器是若干镜面单元拼接构成的抛物曲面,用于实现太阳光能的定向传输与高效聚集^[3-4]。本质上,聚光器是一套精密的光学装置,但受到聚光器网架结构制造和安装的精度限制,镜面单元安装时的调焦过程是必须的。因此,寻求高效率、高精度且低成本的聚光器镜面单元调焦方法,具有重要的工程意义。

随着太阳能光热产业的持续发展,人们提出了各种各样的镜面单元面形,其安装检测方法主要有激光扫描法、摄影法、偏折法(条纹反射法)和吸热管成像法^[5-6]。Jones 等^[7]研制了一台基于视频扫描哈特曼光学测量法的面形检测装置,用来测量碟式聚光器的面形精度,该方法需要利用光线跟踪过程,难以实现镜面单元调焦的实时指导。Shortis 等^[8-9]提出利用摄影法对 SG3 400 m² 碟式聚光器的面形进行测量。之后,建造 SG4 500 m² 碟式聚光器时,Burgess 等^[10]采用摄影法对镜面单元的安装位置进行标定。摄影法基于空间点坐标的测量^[11-12],不受聚光器结构形式的限制,但需要粘贴标志点,是非直接面向聚光性能的镜面调焦方法。偏折法主要用于微观面形误差的检测^[13-16],在镜面单元的调整应用方面未见报道。Diver^[17]首次提出接收靶反射成像法检测碟式聚光器的面形,而后许多学者将其应用于槽式聚光系统中并发展成为吸热管反射法^[18-19]。Ulmer 等^[20]在碟式聚光器焦点处放置涂有彩色条纹的平面靶,用相机拍摄聚光器镜面的彩色条纹来观测镜面误差分布,但作为聚光器镜面单元调焦的定量指导还有待进一步的发展和完善。

DS-CSP 在国内起步较晚,现仍处于示范阶段。寻求一种聚光器视日跟踪状态下准确、高效的指导镜面单元调焦的方法,也不失为一种有效的手段。为此,课题组前期提出了一种基于光斑特征匹配反演镜面单元位姿的方法。通过比对待调焦镜面单元的聚焦光斑特征与已存储数据库中的数据,反演镜面单元的实际位姿并给出螺栓调节量,是直接面向聚光性能的调焦方法^[21]。其关键是找到合适的聚焦光斑特征的量化表征方法,以及建立镜面单元的空间位姿与聚焦光斑特征的唯一对应关系,这也是建立比对数据库的核心。本文针对此关键问题开展研究,为镜面单元调焦系统的研制提供参考。

2 镜面单元的光学模型

课题组与湘电集团合作研制的 DS-CSP 如图 1(a)所示(额定功率为 38 kW,聚光器半径为 8.85 m,焦距为 9.49 m),聚光器镜面为抛物曲面。镜面单元以铝蜂窝板为刚性基体,表面敷设聚氨酯过渡缓冲层(经铣削加工成抛物曲面),最后将镀银镜面粘附在聚氨酯的抛物表面,如图 1(b)所示。镜面单元由固定基板采用球铰螺栓固定在聚光器网架的相应位置(固定基板胶粘在铝蜂窝基体的背部平面),并通过调节螺杆长度来控制镜面单元的空间位姿,安装及调整结构如图 1(b)和 1(c)所示。聚光器的网架结构由多桁架连接构成,网架结构的制造与安装精度难以保证镜面单元的空间位姿,镜面单元安装的调焦过程不可避免。

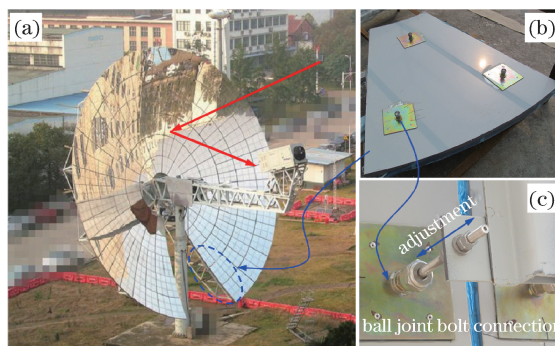


图 1 (a) 38 kW 碟式/斯特林太阳能光热发电系统;(b) 镜面单元;(c) 安装结构

Fig. 1 (a) 38 kW dish/Stirling concentrator solar power system; (b) mirror unit; (c) installation structure

2.1 镜面单元的理想位姿

如图 2 所示,在聚光器反射镜曲面的顶点处建立全局坐标系 $O-xyz$,其中 z 轴指向焦点位置。反射镜曲面的统一空间方程 $F_1(x, y, z)$ 为

$$F_1(x, y, z) = z - f_1(x, y) = 0, \quad (1)$$

式中曲面为抛物曲面时 $f_1(x, y) = (x^2 + y^2)/4f$, f 为焦距。

如图 1(a) 所示, 聚光器反射镜面沿圆周和半径方向均划分为若干镜面单元, 考虑到反射镜面是旋转轴对称结构, 取单一的辐射区域进行研究, 如图 2 所示。取任意镜面单元为对象划分光学网格, 即将镜面单元沿半径方向等长度分为 K 份, 沿圆周方向等夹角分为 M 份, 以网格微元的中心点来计算位置矢量和法线向量, 用于表征镜面单元的光学性能。理想位姿条件下, 网格 km 的中心点 p_{km}^0 的空间位置矢量为

$$\mathbf{p}_{km}^0 = [R_1 + (k - 0.5)d_k, 0, f_1[R_1 + (k - 0.5)d_k, 0]] \cdot \mathbf{R}[\mathbf{e}_z, (m - 0.5)d_m], \quad (2)$$

式中 R_1 为镜面单元的内圆半径; $d_k = R_2/K$ 为网格微元的径向尺寸, R_2 为镜面单元的径向长度; $d_m = \theta/M$ 为网格微元的周向夹角, θ 为镜面单元的周向夹角; $\mathbf{e}_z = [0, 0, 1]$ 为 z 轴的单位方向向量; $\mathbf{R}(\mathbf{e}, \beta)$ 为旋转功能矩阵, 用于实现任意向量绕任意单位向量 $\mathbf{e} = [e_x, e_y, e_z]$ 旋转角度 β 的功能^[4],

$$\mathbf{R}(\mathbf{e}, \beta) = \begin{bmatrix} C + e_x^2(1 - C) & e_x e_y(1 - C) + e_z S & e_x e_z(1 - C) - e_y S \\ e_x e_y(1 - C) - e_z S & C + e_y^2(1 - C) & e_y e_z(1 - C) + e_x S \\ e_x e_z(1 - C) + e_y S & e_y e_z(1 - C) - e_x S & C + e_z^2(1 - C) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $C = \cos \beta$, $S = \sin \beta$ 。

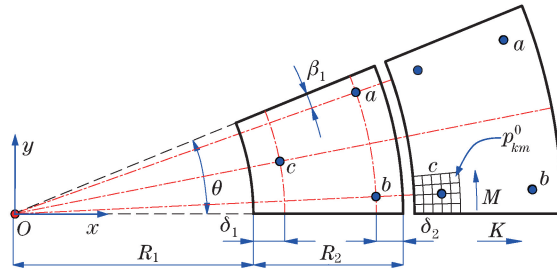


图 2 镜面单元的结构参数与光学网格离散

Fig. 2 Structure parameters and discrete optical grid of the mirror unit

根据曲面微分几何理论, 网格 km 的中心点 p_{km}^0 的法线向量为

$$\mathbf{N}_{km}^0 = s \left[\frac{\partial F_1(x, y, z)}{\partial x}, \frac{\partial F_1(x, y, z)}{\partial y}, \frac{\partial F_1(x, y, z)}{\partial z} \right] \Big|_{p_{km}^0}, \quad (4)$$

式中 s 为符号变量, 用于保证法线向量 \mathbf{N}_{km}^0 指向反射镜曲面的内侧^[22]。

由图 1(b)、(c) 可以看出, 支撑镜面单元的球铰中心位于固定基板的焊接圆柱端部, 而镜面单元的抛物曲面是以铝蜂窝板平面为基准铣削加工的, 所以球铰中心 $A \sim C$ (图 3) 构成的平面 ABC 与支撑投影点 $a \sim c$ (图 2) 构成的平面 abc 是近似平行的, 如图 3 所示。镜面单元表面点 $a \sim c$ 的位置矢量分别为

$$\mathbf{a} = [R_2 - \delta_2, 0, f_1(R_2 - \delta_2, 0)] \cdot \mathbf{R}(\mathbf{e}_z, \theta - \beta_1), \quad (5)$$

$$\mathbf{b} = [R_2 - \delta_2, 0, f_1(R_2 - \delta_2, 0)] \cdot \mathbf{R}(\mathbf{e}_z, \beta_1), \quad (6)$$

$$\mathbf{c} = \begin{cases} [R_1 + \delta_1, 0, f_1(R_1 + \delta_1, 0)] \cdot \mathbf{R}(\mathbf{e}_z, \theta/2) & \text{if } n = 3 \\ [R_1 + \delta_1, 0, f_1(R_1 + \delta_1, 0)] \cdot \mathbf{R}(\mathbf{e}_z, \beta_1) & \text{if } n = 4 \end{cases}, \quad (7)$$

式中 δ_1 和 δ_2 为投影点与镜面单元边缘的距离; β_1 为投影点和原点连线与镜面单元边缘的夹角; n 为镜面单元的球铰支撑数量, $n = 3$ 为三球铰支撑 [图 1(b)], $n = 4$ 为四球铰支撑 (图 3)。

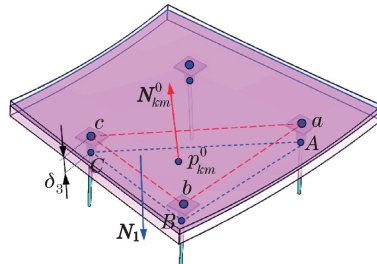


图 3 镜面单元的球铰支撑中心示意图

Fig. 3 Schematic of the ball joint support center of the mirror unit

镜面单元的球铰支撑中心 $A \sim C$ 的位置矢量为

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \mathbf{a} + \delta_3 \cdot \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{B} = \mathbf{b} + \delta_3 \cdot \mathbf{N}_1, \\ \mathbf{C} = \mathbf{c} + \delta_3 \cdot \mathbf{N}_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中 δ_3 为平面 abc 与平面 ABC 的空间距离; \mathbf{N}_1 为平面 abc 的单位法线向量, $\mathbf{N}_1 = (\mathbf{b} - \mathbf{a}) \times (\mathbf{c} - \mathbf{a}) / \|(\mathbf{b} - \mathbf{a}) \times (\mathbf{c} - \mathbf{a})\|$ 。

2.2 位姿误差的等效引入——刚体运动

镜面单元的实际调整过程是平移运动和旋转运动的组合, 结合实际调焦过程以系列刚体运动等效引入位姿误差。具体来说, 镜面单元由理想位置依次进行三次绕轴旋转运动和一次平移运动, 其中旋转轴线由两个球铰中心构成。显然, 不同的旋转顺序及角度值均会影响镜面单元的实际位姿, 刚体运动顺序存在多种组合情况, 如表 1 所示。

表 1 镜面单元刚体运动顺序的组合(旋转运动和平移运动)

Table 1 Combination of the rigid motion sequence for the mirror unit (rotation and translation)

No.	1	2	3	4	5	6
Rotation sequence (axis)	A, B, C	A, C, B	B, A, C	B, C, A	C, A, B	C, B, A
Translation	$\mathbf{M}_1 = [x_1, y_1, z_1]$					

表 1 中镜面单元旋转运动的角度范围为 $-\varphi \sim \varphi$ (单位 rad), 整体平移运动的各轴向分量范围为 $-\delta \sim \delta$ (单位 mm), 将旋转和平移的运动参数进行组合, 获得镜面单元的位姿误差矢量 $\mathbf{T}_{\text{error}} = [\mathbf{R}_i, \mathbf{M}_1]$, 其中 \mathbf{R}_i 为旋转运动矢量, 下标 $i = 1 \sim 6$ 为表 1 中运动顺序的序号; 如 $i = 1$ 时 $\mathbf{R}_i = [\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C]$, 具体运动过程见 2.3 节。此外, 根据镜面单元的刚体运动可知, 镜面单元的平移运动和旋转运动之间不存在先后顺序问题, 即先平移后旋转与先旋转后平移两者的最终位姿一致[根据(9)式可以推导证明], 在 4.2 节也得到了验证。

2.3 镜面单元的光学模型

限于篇幅, 以表 1 的序号 1(A-B-C 旋转运动和平移运动)为例推导位姿误差工况的镜面单元聚光模型, 其中旋转运动如图 4 所示, 步骤如下:

- 1) 镜面单元位于理想位姿, 将球铰中心 A 绕轴线 CB 旋转角度 φ_A (规定: 球铰中心的 z 轴坐标分量增加为正夹角, 且对应的旋转轴方向为正方向), 运动到 A_1 位置;
- 2) 将球铰中心 B 绕轴线 A_1C 旋转角度 φ_B , 运动到 B_1 位置;
- 3) 将球铰中心 C 绕轴线 B_1A_1 旋转角度 φ_C , 运动到 C_1 位置;
- 4) 将镜面单元按向量 $\mathbf{M}_1 = [x_1, y_1, z_1]$ 进行平移运动。

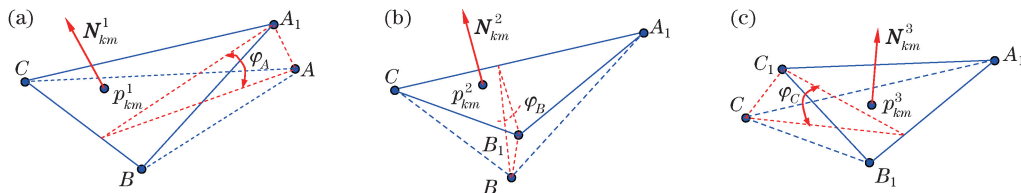


图 4 镜面单元位姿误差的等效运动

Fig. 4 Equivalent movement of the mirror unit posture error

经过上述过程, 镜面单元内网格 km 的中心点 p_{km}^0 运动到 p_{km}^4 位置, 运动过程的位置矢量分别为

$$\begin{cases} \mathbf{p}_{km}^1 = (\mathbf{p}_{km}^0 - \mathbf{C}) \cdot \mathbf{R}(e_{CB}, \varphi_A) + \mathbf{C} \\ \mathbf{p}_{km}^2 = (\mathbf{p}_{km}^1 - \mathbf{C}) \cdot \mathbf{R}(e_{A_1C}, \varphi_B) + \mathbf{C} \\ \mathbf{p}_{km}^3 = (\mathbf{p}_{km}^2 - \mathbf{B}_1) \cdot \mathbf{R}(e_{B_1A_1}, \varphi_C) + \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{p}_{km}^4 = \mathbf{p}_{km}^3 + \mathbf{M}_1 \end{cases}, \quad (9)$$

式中单位向量 $e_{CB} = (\mathbf{B} - \mathbf{C}) / \|\mathbf{B} - \mathbf{C}\|$, $e_{A_1C} = (\mathbf{C} - \mathbf{A}_1) / \|\mathbf{C} - \mathbf{A}_1\|$, $e_{B_1A_1} = (\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1) / \|\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1\|$, $\mathbf{A}_1 = (\mathbf{A} - \mathbf{C}) \cdot \mathbf{R}(e_{CB}, \varphi_A) + \mathbf{C}$, $\mathbf{B}_1 = (\mathbf{B} - \mathbf{C}) \cdot \mathbf{R}(e_{A_1C}, \varphi_B) + \mathbf{C}$ 。

引入位姿误差, 镜面单元网格微元 km 的法线向量由 \mathbf{N}_{km}^0 旋转至 \mathbf{N}_{km}^4 ,

$$\mathbf{N}_{km}^4 = \mathbf{N}_{km}^0 \cdot \mathbf{R}(\mathbf{e}_{CB}, \varphi_A) \cdot \mathbf{R}(\mathbf{e}_{A_1C}, \varphi_B) \cdot \mathbf{R}(\mathbf{e}_{B_1A_1}, \varphi_C) = \mathbf{N}_{km}^0 \cdot \mathbf{H}_3^{ABC}, \quad (10)$$

式中旋转总矩阵 $\mathbf{H}_3^{ABC} = \mathbf{R}(\mathbf{e}_{CB}, \varphi_A) \cdot \mathbf{R}(\mathbf{e}_{A_1C}, \varphi_B) \cdot \mathbf{R}(\mathbf{e}_{B_1A_1}, \varphi_C)$ 。

此时, 镜面单元网格微元 km 的有效采光面积为

$$S_{km} = \frac{\theta}{2M} \{ (kd_k + R_1)^2 - [(k-1)d_k + R_1]^2 \} \frac{\mathbf{e}_z \cdot (\mathbf{e}_z \cdot \mathbf{H}_3^{ABC})}{\|\mathbf{e}_z\| \cdot \|\mathbf{e}_z \cdot \mathbf{H}_3^{ABC}\|}. \quad (11)$$

进一步, 可以获得镜面单元球铰中心的误差距离, 用于指导镜面单元位姿调整时螺杆的伸缩量, 但要区分旋转运动和平移运动两者的独立贡献。因为旋转运动贡献的误差距离(存在空间约束性)可通过调节螺杆长度进行纠正, 而平移运动的误差距离是无约束的, 仅能通过整体平移进行纠正, 在镜面单元调焦时一般较难处理。因此, 仅给出旋转运动贡献的球铰中心 $A \sim C$ 的误差距离 $d_A \sim d_C$,

$$\begin{cases} d_A = \|\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}\| \\ d_B = \|\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}\|, \\ d_C = \|\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}\| \end{cases} \quad (12)$$

式中向量 $\mathbf{C}_1 = (\mathbf{C} - \mathbf{B}_1) \cdot \mathbf{R}(\mathbf{e}_{B_1A_1}, \varphi_C) + \mathbf{B}_1$ 。

3 聚焦光斑的几何表征

镜面单元接收的光源特性直接影响聚焦光斑的分布特征, 调焦用光源主要有人造平行光源和太阳非平行光源等, 仅对太阳非平行光源的镜面单元聚焦光斑特征进行分析。

3.1 聚焦光斑分布的数值模拟

镜面单元的聚焦能流分布计算采用光线跟踪方法^[4,22], 太阳光模型及锥角离散方法详见文献[22]。结合(9)式和(10)式得到镜面单元的反射光线方程, 联立接收靶平面(取焦平面)方程求解得到交点, 判断该交点从属的网格编号(接收靶平面是以焦点 F 为中心的正方形, 边长为 L , 划分网格为 $W \times V$ 份, 且 $W=V$, 如图6所示, 网格起始编号在右上角位置), 将该光线携带的能量[镜面单元网格微元的采光面积由(11)式计算]累加至从属的网格区域, 具体平面接收器的能流分布计算公式见文献[4]。

3.2 光斑特征的表征及提取

以某抛物镜面单元为例, 计算参数为: $R_1 = 7496.0 \text{ mm}$, $R_2 = 1354.0 \text{ mm}$, $\theta = 15^\circ$, $f = 9490.0 \text{ mm}$, $\delta_1 = \delta_2 = 50.0 \text{ mm}$, $\delta_3 = 35.0 \text{ mm}$, $\beta_1 = 2^\circ$, 球铰支撑数量 $n = 3$, 太阳直射辐照强度 $W_0 = 1000.0 \text{ W/m}^2$, 记上述镜面单元型号为 M00-1。初步计算 27 组位姿误差工况的聚焦光斑, 发现各光斑等值线均呈近似椭圆形状, 且聚焦光斑的中心位置和位姿(椭圆的长短轴尺寸及其偏斜角度)均有差异。说明镜面单元的聚焦光斑可以采用椭圆进行表征, 且镜面单元的位姿误差矢量 $\mathbf{T}_{\text{error}}$ 与聚焦光斑之间存在一定的对应关系, 为聚焦光斑特征反演镜面单元位姿提供了可能。图5为 27 组误差工况中焦平面局部区域的光斑等值线图。

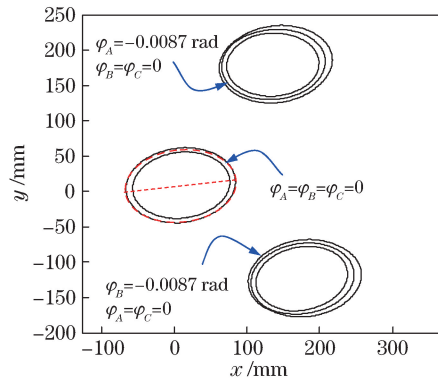


图5 镜面单元位姿误差对聚焦光斑分布的影响

Fig. 5 Effect of mirror unit posture error on focal spot distribution

针对扇形的镜面单元,要确定镜面单元的位姿误差特征与聚焦光斑特征的对对应关系,关键是准确提取聚焦光斑的椭圆几何特征。如图 6 所示,在焦平面建立局部坐标系 $F-x_F y_F$ (点 F 为焦点),椭圆的定量描述参数包括几何中心点 O_1 坐标 (x_0, y_0) (也可用距离 d 和夹角 ϕ_1 来描述)、椭圆长半轴的尺寸 a 及其与 x_F 轴的夹角 ϕ_2 、短半轴尺寸 b 。

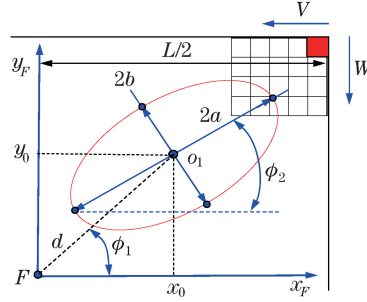


图 6 镜面单元聚焦光斑特征的椭圆表征

Fig. 6 Elliptical representation of the mirror unit focal spot characteristics

实际的聚焦光斑零值边界(局部聚光比为 0)一般分辨率较低,容易受外界环境和光斑图像采集等因素影响,引入局部聚光比(某位置的能流密度值与太阳直射辐照强度的比值)阈值 C_t ,将聚焦光斑中局部聚光比接近或等于阈值 C_t 的位置提取为边界点,并依据此若干边界点来拟合椭圆,进而确定聚焦光斑的特征矢量。明显地,接收靶表面的能流分布梯度较大,边界提取时恰好满足局部聚光比等于阈值 C_t 是很难的,一般是较 C_t 偏大或偏小。因此,结合图 6 所示的接收靶离散网格,边界点的搜索方法是:先从上至下逐列提取等值线的上边界点及坐标;而后从下至上逐列提取等值线的下边界点及坐标。逐列搜索时查找满足 $I(w, v)/W_0 \leq C_t \leq I(w+1, v)/W_0$ 的 2 个邻近网格,再根据 $\min(|I(w, v)/W_0 - C_t|, |I(w+1, v)/W_0 - C_t|)$ 选取差值最小的相应网格中心作为边界点,将其坐标记为 $C_i(x_i, y_i)$ 。其中, $I(w, v)$ 为网格编号为 w, v 的能流密度值;函数 $\min(a, b)$ 表示取 a 和 b 中最小的数。

3.3 光斑特征几何的拟合

根据图 6 所示椭圆光斑的 5 个几何特征参数,椭圆方程可描述为

$$\frac{[(x - x_0) \cos \phi_2 + (y - y_0) \sin \phi_2]^2}{a^2} + \frac{[(y - y_0) \cos \phi_2 - (x - x_0) \sin \phi_2]^2}{b^2} = 1. \quad (13)$$

由于(13)式展开后是复杂的 5 元 4 次非线性方程,较难直接应用最小二乘法进行拟合,采用文献[23]提出的变量代换方法,将(13)式改写成线性方程,即

$$x^2 + Ax y + B y^2 + C x + D y + E = 0, \quad (14)$$

式中系数 A, B, C, D 和 E 的含义详见文献[23]。

根据 3.2 节提取的边界点坐标 $C_i(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, N$, 其中 N 为边界点的总数,结合椭圆线性方程(14)式,根据最小二乘法原理和极值原理,得到正规方程组为

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N y_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N y_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^3 y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

可以看出, (15)式的左边系数矩阵各元素的数值存在一定差异,尤其当坐标 $C_i(x_i, y_i)$ 的数值较大时,其逆

矩阵求解时将产生较大的数值误差。例如, $\sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2$ 与 N 的数值相差巨大。因此,将提取的边界点进行整体平移处理,计算公式为

$$\begin{cases} x'_i = x_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \\ y'_i = y_i - \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \end{cases} \quad (16)$$

而后用(16)式的 x'_i, y'_i 替换(15)式的 x_i, y_i 值,进而求解(15)式的系数 $A \sim E$,并根据系数 $A \sim E$ 反求椭圆的特征参数,计算公式分别为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{2BC - AD}{A^2 - 4B} + \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \\ y_0 = \frac{2D - AD}{A^2 - 4B} + \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \\ a = \frac{\sqrt{2(ACD - BC^2 - D^2 + 4BE - A^2E)}}{\sqrt{(A^2 - 4B)[B - \sqrt{A^2 + (1 - B)^2 + 1}}} \\ b = \frac{\sqrt{2(ACD - BC^2 - D^2 + 4BE - A^2E)}}{\sqrt{(A^2 - 4B)[B + \sqrt{A^2 + (1 - B)^2 + 1}}} \\ \phi_2 = \arctan \sqrt{\frac{a^2 - b^2 B}{a^2 B - b^2}} \end{cases} \quad (17)$$

最后,聚焦光斑的特征矢量为(除特别说明外,文中均采用中心坐标形式)

$$\mathbf{T}_{\text{flux}} = [d, \phi_1, \phi_2, a, b] = [x_0, y_0, \phi_2, a, b], \quad (18)$$

式中距离 $d = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ 。采用距离 d 和夹角 ϕ_1 能够较好地描述聚焦光斑的偏移程度(理想聚光情况下光斑中心与焦点 F 重合,距离 $d=0$)。夹角 ϕ_1 和 ϕ_2 的单位均为 rad,其余表征参数的单位均为 mm。

4 数值结果与分析

基于 Microsoft Visual C++ 平台,编制抛物聚光器镜面单元的聚焦光斑能流密度分布计算程序,探讨太阳直射辐照值 W_0 、等值边界提取阈值 C_t 、镜面单元结构参数和位姿误差特征矢量 $\mathbf{T}_{\text{error}}$ 等对聚焦光斑特征的影响。

4.1 基础参数的影响研究

4.1.1 太阳直射辐照值对聚焦光斑特征矢量的影响

以镜面单元 M00-1 为例,取 $W_0 = 800.0 \text{ W/m}^2$ 和 $W_0 = 1200.0 \text{ W/m}^2$,边界提取阈值 $C_t = 250$,聚焦光斑能流分布如图 7 所示。两种太阳直射辐照值情况的光斑特征矢量数值相差甚小,提取的等值边界点基本是相同的。说明太阳直射辐照强度仅影响聚焦光斑能流密度的数值大小,对光斑几何特征没有影响,引入阈值 C_t 可以排除不同太阳直射辐照值对光斑几何特征的影响。同时也说明镜面单元是一个线性系统,整个聚光过程满足叠加性,即太阳光输入信号的大小仅改变聚焦光斑能流密度的数值,而不改变其分布的几何形状,这也是从聚光器整体聚焦光斑中分离出待调镜面单元聚焦光斑的基础。

4.1.2 边界提取阈值和镜面单元尺寸对聚焦光斑特征的影响

图 8 为阈值 C_t 和镜面单元尺寸对光斑特征矢量的影响曲线。图 8(a)为镜面单元 M00-1 的理想聚光工况;图 8(b)为 M00-1 旋转误差和平移误差组合工况,ABC 旋转顺序为 $\mathbf{R}_1 = [-0.013, -0.015, -0.016]$,平

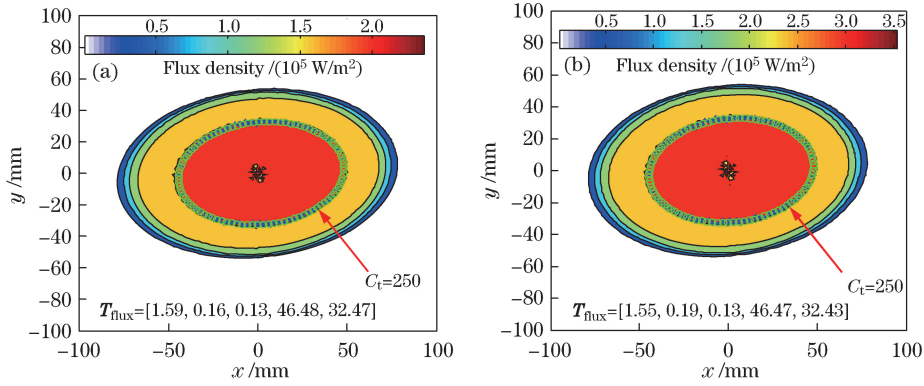


图 7 太阳直射辐照值对聚焦光斑能流密度的影响。(a) $W_0 = 800.0 \text{ W/m}^2$; (b) $W_0 = 1200.0 \text{ W/m}^2$

Fig. 7 Effect of direct normal solar irradiation on flux density of focal spot. (a) $W_0 = 800.0 \text{ W/m}^2$; (b) $W_0 = 1200.0 \text{ W/m}^2$

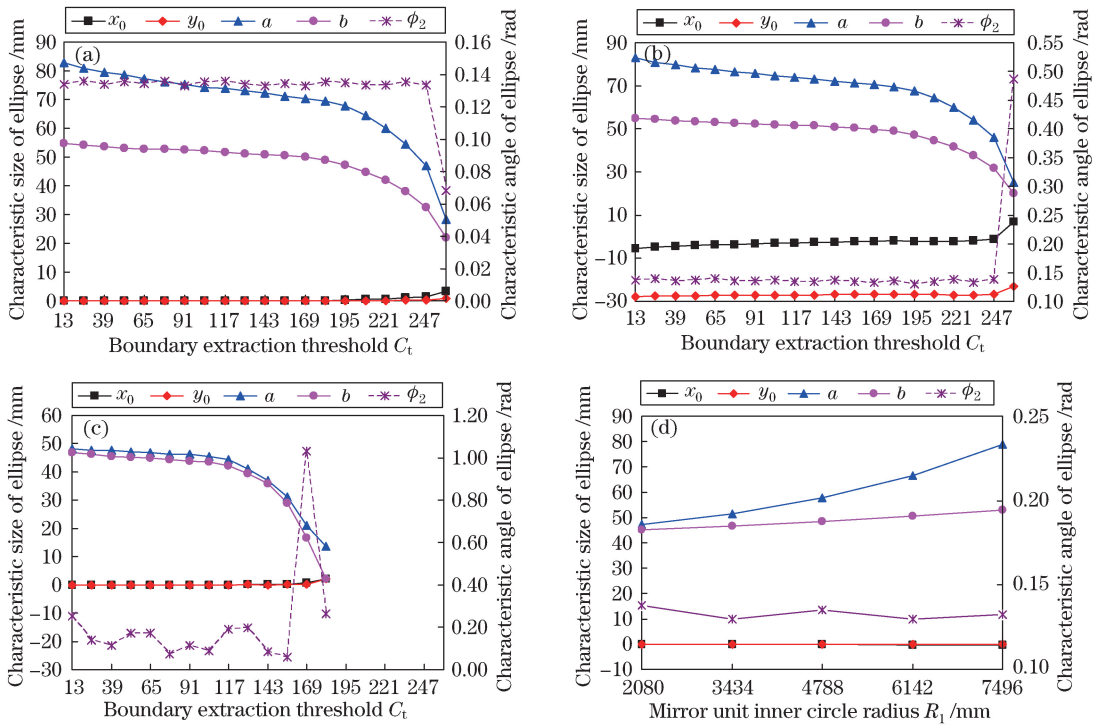


图 8 边界提取阈值和镜面单元尺寸对聚焦光斑特征的影响。(a)理想聚光工况;(b)旋转误差和平移误差组合工况;

(c) $R_1 = 7496.0 \text{ mm}$ 、改变 C_t 时的理想聚光工况;(d) $C_t = 50$ 、改变 R_1 时的理想聚光工况

Fig. 8 Influence of the boundary extraction threshold and the mirror unit size on the focal spot characteristics.

(a) Ideal focusing condition; (b) focusing condition at combination of rotation error and translation error;

(c) ideal focusing condition when $R_1 = 7496.0 \text{ mm}$ and C_t changes;

(d) ideal focusing condition when $C_t = 50$ and R_1 changes

移误差矢量 $\mathbf{M}_1 = [10.0, 10.0, 25.0]$; 图 8(c) 是在 M00-1 基础上仅改变边界提取阈值 C_t , 内圆半径 $R_1 = 7496.0 \text{ mm}$ 时的理想聚光工况; 图 8(d) 是在 M00-1 基础上仅改变内圆半径 R_1 , 边界提取阈值 $C_t = 50$ 时的理想聚光工况。上述计算中, 太阳直射辐照值均为 $W_0 = 800.0 \text{ W/m}^2$ 。

由图 8(a)~(c) 可知, 随着阈值 C_t 的增大, 聚集光斑特征矢量的椭圆长短半轴尺寸 a 和 b 逐渐减小, 在一定范围内夹角 ϕ_2 基本稳定。但当阈值 C_t 超过一定值时, 椭圆几何的长短半轴尺寸较为接近, 等值边界将呈现为近似圆形几何, 导致长短轴的确定较为困难, 夹角 ϕ_2 出现较大的突变。阈值 C_t 的改变对聚焦光斑特征矢量的中心坐标值影响最小, 说明聚焦光斑中心位于能流密度的峰值位置, 各等值边界的椭圆几何呈同心分布且长短轴基本重合。由图 8(d) 可知, 镜面单元的尺寸及位置区域对聚焦光斑特征矢量有一定的影响, 但仍表现为椭圆或近似圆形的几何特征。随着镜面单元内圆半径 R_1 的减小(越靠近聚光器内环), 聚焦光

斑特征矢量的椭圆长短轴尺寸更为接近,导致夹角 ϕ_2 具有一定的波动性。

整体来说,聚焦光斑特征矢量的中心坐标 x_0 和 y_0 、夹角 ϕ_2 基本不随边界阈值的变化(一定范围内)而改变,具有一定的稳定性,是聚焦光斑特征比对的主要参数,椭圆长短半轴作为辅助识别参数。

4.2 旋转误差和平移误差对聚焦光斑特征的影响

以镜面单元 M00-1 为例, $W_0=800.0 \text{ W/m}^2$, 阈值 $C_1=100$, 焦平面接收靶尺寸设为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$, 结果中聚焦光斑超过接收区域的部分将不再显示。旋转误差 $\mathbf{R}_1=[\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C]$ 和平移误差 $\mathbf{M}_1=[x_1, y_1, z_1]$ 的分量及组合序号 N 均由

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 = \left[(i-1) \frac{2\varphi}{m-1} - \varphi, (j-1) \frac{2\varphi}{m-1} - \varphi, (k-1) \frac{2\varphi}{m-1} - \varphi \right] \\ \mathbf{M}_1 = \left[(i-1) \frac{2\delta}{m-1} - \delta, (j-1) \frac{2\delta}{m-1} - \delta, (k-1) \frac{2\delta}{m-1} - \delta \right] \end{cases} \quad (19)$$

确定,式中循环数 $i, j, k=1, 2, \dots, m$ 。参数组合过程为: k 从 1 至 m 循环一次, j 值加 1; j 从 1 至 m 循环一次, i 值加 1。上述参数组合总数 $N=m^3$,且每当 k 和 j 等于 $m+1$ 时将其值更新 1,再次进行循环组合。旋转误差的最大夹角 $\varphi=0.0087 \text{ rad}$ (即 0.5°),平移误差的最大分量 $\delta=12.5 \text{ mm}$,等分数均为 $m=4$ 。计算了平移、旋转及两者混合三种误差形式的聚焦光斑特征,混合误差为相同序号 N 的旋转误差矢量和平移误差矢量的叠加,计算结果如图 9 所示。为方便作图及描述,以序号 N 为坐标横轴。

由图 9(a)可知,镜面单元的整体平移误差对聚焦光斑特征的影响较小,椭圆长短半轴 a, b 及夹角 ϕ_2 基本不变,仅光斑中心产生较小偏移,且偏移量与平移误差值呈正相关的关系。实际的镜面单元安装初定位精度均能控制在 $10 \sim 20 \text{ mm}$ 内,鉴于镜面单元的平移误差是无约束误差,调整较为困难,可选择性地不予消除。

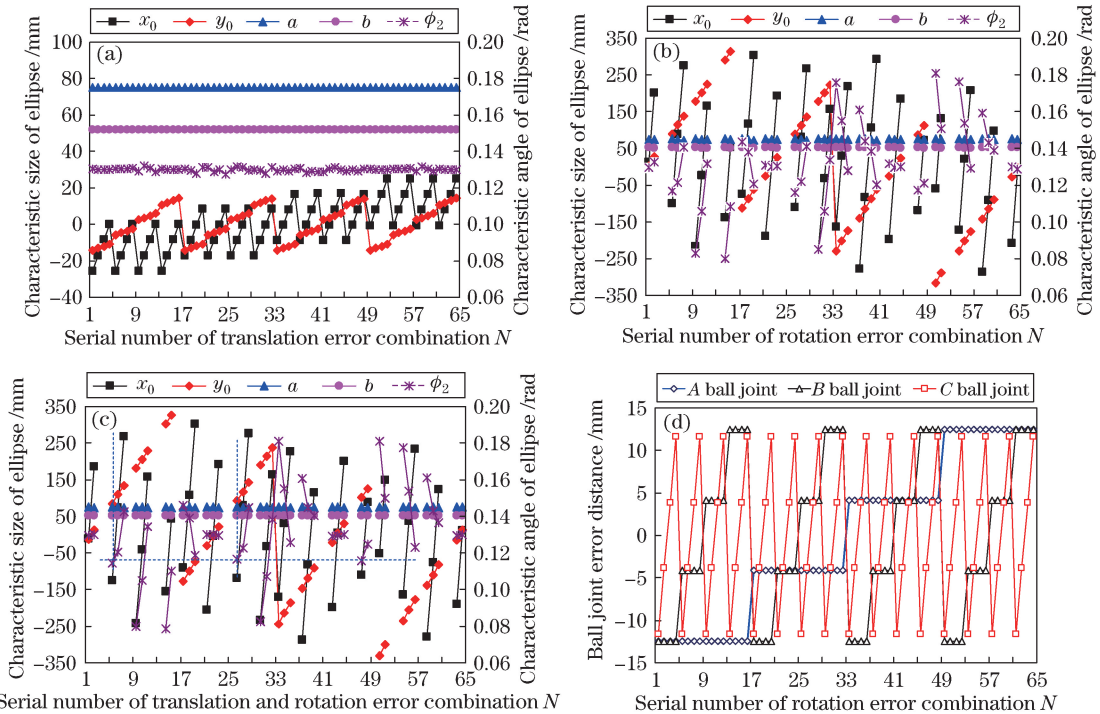


图 9 (a) 平移误差、(b) 旋转误差及 (c) 两者混合误差对聚焦光斑特征的影响;(d) 旋转误差产生的球铰误差距离

Fig. 9 Effect of (a) translation error, (b) rotation error as well as (c) their error combination on the focal spot characteristics; (d) ball joint error distance caused by rotation error

由图 9(b)、(d)可知,镜面单元的旋转误差对球铰中心的误差距离的贡献虽小(在 13 mm 以内),但对聚焦光斑的分布特征影响显著。例如,工况 $N=24$,误差矢量 $\mathbf{R}_1=[-0.0029, -0.0029, 0.0087]$, 镜面单元 A~C 球铰中心的误差距离分别为 $-4.14, -4.14, 11.59 \text{ mm}$,此时聚焦光斑已超出设定的接收区域。工况 $N=1$,误差矢量 $\mathbf{R}_1=[-0.0087, -0.0087, -0.0087]$, 镜面单元 A~C 球铰中心误差距离分别为 $-12.42,$

-12.42, -11.59 mm, 聚焦光斑特征矢量 $\mathbf{T}_{\text{flux}} = [13.44, 1.76, 0.13, 74.96, 52.04]$, 并未产生较大的光斑偏移。这说明镜面单元微小旋转误差对聚焦光斑影响显著, 但并不是简单的聚焦光斑偏移距离正相关于旋转夹角值, 而是表现为误差夹角方向向同时减弱(如工况 $N=1$)、异向时增强的规律。

由图 9(a)~(c)可知, 镜面单元混合误差工况的光斑中心坐标等于平移和旋转误差单独工况的数值叠加, 夹角 ϕ_2 与旋转误差工况一致, 椭圆长短半轴尺寸 a 和 b 在三种误差工况下基本一致。验证了平移误差与旋转误差两者的非耦合特性, 这对镜面单元的调焦是非常有益的。

4.3 旋转误差工况镜面单元参数对光斑特征的影响

以镜面单元 Par 1~Par 5 为例, 镜面单元 Par 2~Par 5 仅在 Par 1 基础上更改某一参数。镜面单元 Par 1: $R_1=7496.0$ mm, $R_2=1354.0$ mm, $\theta=15^\circ$, $f=9490.0$ mm, $\delta_1=\delta_2=100.0$ mm, $\delta_3=35.0$ mm, $\beta_1=2^\circ$, 球铰数量 $n=3$; 镜面单元 Par 2: $f=8000.0$ mm; 镜面单元 Par 3: $n=4$; 镜面单元 Par 4: $\theta=25^\circ$; 镜面单元 Par 5: $R_1=4788.0$ mm。设定接收靶尺寸为 600 mm \times 600 mm, 位于焦平面; 太阳直射辐照强度 $W_0=800.0$ W/m², 阈值 $C_t=50$ 。当光斑超出接收靶时, 将其中心坐标置为 310.0 mm(相当于剔除), 并将长短半轴及夹角均置为 0 。镜面单元的位姿误差仅考虑 ABC 顺序的旋转误差(旋转顺序对聚光影响较小, 见 4.4 节分析)。误差组合值及工况序号 N 仍由(19)式确定, 最大夹角 $\varphi=0.0131$ rad(即 0.75°), 等分数 $m=9$, 工况总数 729 组, 旋转夹角步距 0.0033 rad, 球铰中心误差距离的步距约为 3.0 mm, 与真实的螺杆伸缩调整精度相当, 但往往是 3.0 mm 的距离变化也将导致聚焦光斑偏移较大。图 10 为镜面单元 Par 1~Par 5 在旋转误差工况的聚焦光斑特征分布图, 可通过散点的分布密度来定性表征影响程度。

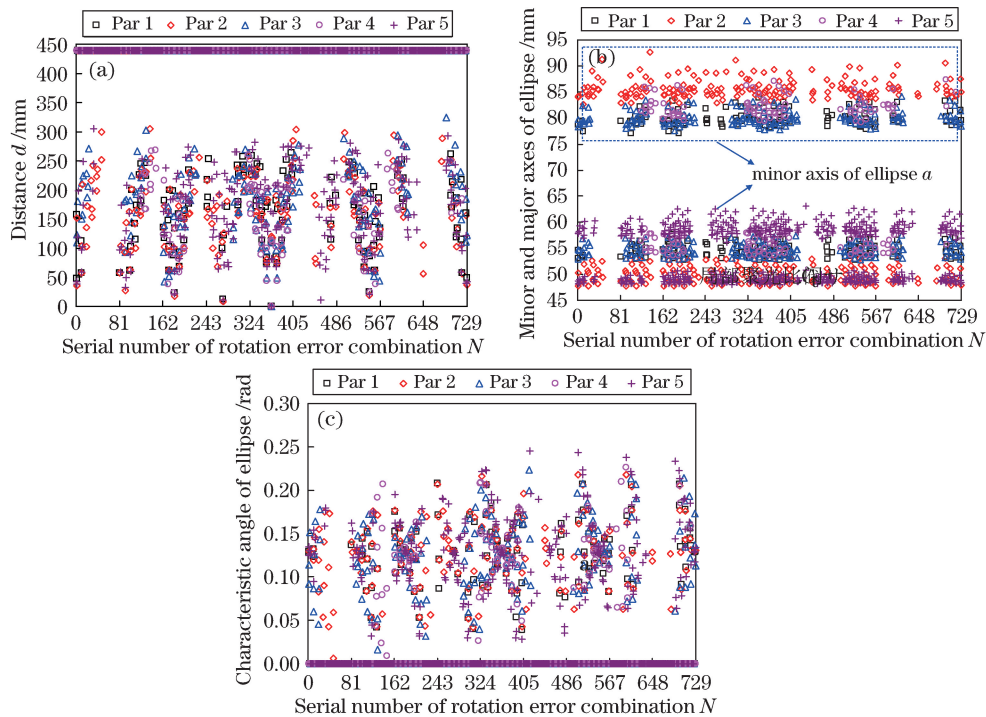


图 10 旋转误差工况下镜面单元参数对聚焦光斑特征的影响。(a)聚焦光斑中心与焦点的距离; (b)椭圆长短半轴; (c)椭圆特征角

Fig. 10 Effect of the mirror unit structure parameters on the focal spot characteristics under rotation error condition.

(a) Distance between focal spot and focus; (b) minor and major axes of ellipse; (c) characteristic angle of ellipse

图 10(a)为聚焦光斑中心与焦点的距离 d , 从离散点的分布密度可以看出, 镜面单元焦半径越大, 旋转误差对其聚光性能影响越为显著; 镜面单元支撑球铰数量对镜面调整具有一定的影响, 但从散点密度来看影响并不显著; 镜面单元沿圆周方向尺寸增大时旋转误差对其聚光性能的影响增强, 镜面单元内圆半径较小时, 镜面单元的曲面梯度较外环小, 聚光性能对旋转误差的敏感度较外环弱。

由图 10(b)、(c)可知, 各镜面单元聚焦光斑特征矢量的长短半轴 a 和 b 波动幅度均较小, 基本在 $10.0\sim 15.0$ mm 范围内。夹角 ϕ_2 在 $0\sim 0.25$ rad(即 14.33°)的较小范围内变化, 但对光斑特征的匹配识别较为重

要,是平移误差、旋转误差及混合误差的分辨基础。此外,聚焦光斑的中心偏移距离 d 和夹角 ϕ_2 之间存在一定的耦合关系,一般中心偏移距离 d 较大时夹角 ϕ_2 也较大,对光斑特征匹配识别是有益的。

4.4 旋转误差顺序对光斑特征的影响

将镜面单元 M00-1 的球铰支撑数量更改为 $n=4$,取 $W_0=800.0 \text{ W/m}^2$, 阈值 $C_1=50$,采用 4.3 节的旋转误差组合参数[即误差组合值及工况序号 N 由(19)式确定,最大夹角 $\varphi=0.0131 \text{ rad}$,等分数 $m=9$, $N=729$],计算表 1 中 6 种旋转顺序工况的聚焦光斑特征矢量,发现结果与旋转顺序无关,文中仅给出 ABC 旋转顺序的结果,如图 11 所示。经分析,旋转误差角非常小, $\varphi=0\sim 0.18 \text{ rad}$ 时,基本满足 $\varphi\approx \sin \varphi$ 和 $\cos \varphi\approx 1.0$,数值误差在 0.6% 以内。同时由于镜面单元尺度远大于旋转误差距离尺度,数值计算时旋转轴单位方向矢量基本一致。下面进行简要的推导与证明,由于误差角是微小量,可将旋转功能矩阵(3)式简化为

$$\mathbf{R}(\mathbf{e}, \varphi) = \begin{bmatrix} 1.0 & e_z \varphi & -e_y \varphi \\ -e_z \varphi & 1.0 & e_x \varphi \\ e_y \varphi & -e_x \varphi & 1.0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

考虑镜面单元尺度远大于旋转误差距离尺度,可认为 $\mathbf{e}_{A_1C} \approx \mathbf{e}_{AC}$ 和 $\mathbf{e}_{B_1A_1} \approx \mathbf{e}_{BA}$,并舍去二阶及以上的高阶小量(如 $\varphi_A \varphi_B$ 为二阶小量),可将(10)式的旋转总矩阵 \mathbf{H}_3^{ABC} 线性化为

$$\mathbf{H}_3^{ABC} = \begin{bmatrix} 1.0 & e_{CB}^z \varphi_A + e_{AC}^z \varphi_B + e_{BA}^z \varphi_C & -e_{CB}^y \varphi_A - e_{AC}^y \varphi_B - e_{BA}^y \varphi_C \\ -e_{CB}^z \varphi_A - e_{AC}^z \varphi_B - e_{BA}^z \varphi_C & 1.0 & e_{CB}^x \varphi_A + e_{AC}^x \varphi_B + e_{BA}^x \varphi_C \\ e_{CB}^y \varphi_A + e_{AC}^y \varphi_B + e_{BA}^y \varphi_C & -e_{CB}^x \varphi_A - e_{AC}^x \varphi_B - e_{BA}^x \varphi_C & 1.0 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

式中 $\mathbf{e}_{AC} = [e_{AC}^x, e_{AC}^y, e_{AC}^z]$, $\mathbf{e}_{CB} = [e_{CB}^x, e_{CB}^y, e_{CB}^z]$, $\mathbf{e}_{BA} = [e_{BA}^x, e_{BA}^y, e_{BA}^z]$ 。

同理,求解其他旋转顺序的旋转总矩阵,可得

$$\mathbf{H}_3^{ABC} = \mathbf{H}_3^{ACB} = \mathbf{H}_3^{BCD} = \mathbf{H}_3^{BDC} = \mathbf{H}_3^{CAB} = \mathbf{H}_3^{CBA} \quad (22)$$

此外,将(9)式整理得到

$$\mathbf{p}_{km}^4 = \mathbf{p}_{km}^0 \cdot \mathbf{H}_3^{ABC} - \mathbf{C} \cdot \mathbf{H}_3^{ABC} + \mathbf{C}_1 + \mathbf{M}_1 \quad (23)$$

由于反射点位置对聚光影响较小,且镜面单元的位置误差也较小,可将(23)式简化为

$$\mathbf{p}_{km}^4 \approx \mathbf{p}_{km}^0 \cdot \mathbf{H}_3^{ABC} + \mathbf{M}_1 \quad (24)$$

同理,其他旋转顺序工况的反射点位置矢量也可简化成(24)式的形式。

由(22)式和(24)式可知,镜面单元反射点的位置矢量与法线向量均与旋转误差顺序无关。虽然推导过程是基于镜面单元大尺度且旋转夹角较小的假设条件,但实际调焦过程亦满足此条件。如此简化能大量减少数据库比对工作,使调焦指导更具有实时性。

由图 11 可以看出,聚焦光斑特征矢量具有较好的可区分性,尤其是中心坐标 x_0 、 y_0 和夹角 ϕ_2 均较为离散,是数据比对的首选。可将拍摄光斑图像的特征矢量与图 11 结果进行比对,快速确定镜面单元的实际安装位姿,从而将相应的球铰误差距离反馈给调整人员,沿相反方向进行调整即可完成镜面单元的调焦,这也是接下来要开展的工作。

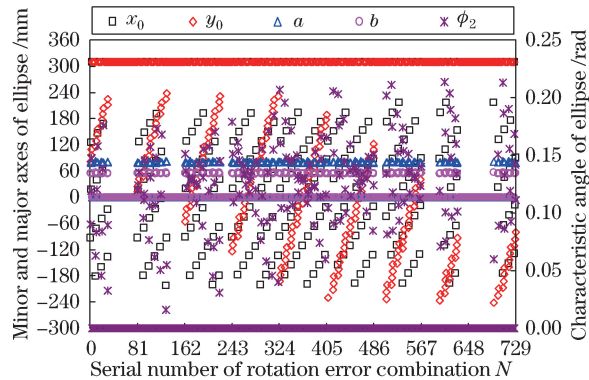


图 11 镜面单元位姿误差工况的聚焦光斑特征矢量分布

Fig. 11 Characteristic vector distribution of focal spot under mirror unit posture error condition

5 结 论

提出以镜面单元旋转和平移运动的组合来等效引入位姿误差,并采用椭圆几何来定量表征聚焦光斑的分布特征,建立了镜面单元空间位姿与聚焦光斑特征唯一的定量对应关系,可用于镜面单元空间位姿的快速反演,为其调焦过程的定量指导提供了新途径。通过引入聚光比阈值来提取聚焦光斑的椭圆特征边界,消除了太阳直射辐照强度对聚焦光斑特征的影响。镜面单元的平移误差与旋转误差对聚焦过程的影响是独立的,镜面单元调焦应以消除旋转误差为主,平移误差对聚焦影响较小且是非约束的,可选择性地放弃调整。镜面单元位姿误差工况的聚焦光斑特征具有明显的可区分性,椭圆的中心坐标和位姿夹角是数据比对的首选,且位姿夹角也是平移误差、旋转误差及混合误差的分辨基础。在镜面单元大尺度且旋转误差夹角较小时,镜面单元的误差旋转顺序不影响聚焦光斑特征,使位姿反演和调焦指导更具实时性,研究结果能为后续镜面单元调焦系统的研制提供数据支持。

参 考 文 献

- 1 Baharoon D A, Rahman H A, Omar W Z W, *et al.* Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently - a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 996-1027.
- 2 Chien J C L, Lior N. Concentrating solar thermal power as a viable alternative in China's electricity supply[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(12): 7622-7636.
- 3 Mancini T, Heller P, Butler B, *et al.* Dish-Stirling systems: An overview of development and status[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003, 125(2): 135-151.
- 4 Yan Jian, Peng Youduo, Yu Jiahuan, *et al.* Research on thermal-structural-optical multi-field coupling modeling and concentrating performance predication of solar dish system[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(14): 138-151.
颜 健, 彭佑多, 余佳焕, 等. 碟式太阳能光热系统光-机-热多场耦合建模及其聚光性能预测应用[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(14): 138-151.
- 5 Ren L X, Wei X D, Lu Z W, *et al.* A review of available methods for the alignment of mirror facets of solar concentrator in solar thermal power system[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 32: 76-83.
- 6 Xiao J, Wei X D, Lu Z W, *et al.* A review of available methods for surface shape measurement of solar concentrator in solar thermal power applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 2539-2544.
- 7 Jones S A, Neal D R, Gruetzner J K, *et al.* VSHOT: A tool for characterizing large, imprecise reflectors [C/OL]. [2016-04-20]. <http://www.osti.gov/scitech/biblio/396613>.
- 8 Shortis M R, Johnston G H G. Photogrammetry: An available surface characterization tool for solar concentrators, part I: Measurements of surfaces[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1996, 118(3): 146-150.
- 9 Johnston G, Shortis M. Photogrammetry: An available surface characterization tool for solar concentrators, part II: Assessment of surfaces[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1997, 119: 286-291.
- 10 Burgess G, Shortis M, Kearton A, *et al.* Photogrammetry for dish concentrator construction [C]. 47th ANZSES Conference, 2009: 1-10.
- 11 García-Cortés S, Bello-García A, Ordóñez C. Estimating intercept factor of a parabolic solar trough collector with new supporting structure using off-the-shelf photogrammetric equipment[J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 815-821.
- 12 de Asís López F, García-Cortés S, Roca-Pardiñas J, *et al.* Geometric optimization of trough collectors using terrestrial laser scanning: Feasibility analysis using a new statistical assessment method[J]. *Measurement*, 2014, 47: 92-99.
- 13 Knauer M C, Kaminski J, Hausler G. Phase measuring deflectometry: A new approach to measure specular free-form surfaces[C]. *SPIE*, 2004, 5457: 366-376.
- 14 Ulmer S, März T, Prah C, *et al.* Automated high resolution measurement of heliostat slope errors[J]. *Solar Energy*, 2011, 85(4): 681-687.
- 15 Wang Huarong, Li Bin, Wang Zhifeng, *et al.* Surface measurement of parabolic trough unit mirror based on fringe reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0112007.
王华荣, 李 彬, 王志峰, 等. 基于条纹反射术的槽式抛物面单元镜面形测量[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0112007.
- 16 Xiao Jun, Wei Xiudong, Lu Zhenwu, *et al.* A fast surface shape measurement method for the parabolic trough solar concentrator based on deflectometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1208006.
肖 君, 魏秀东, 卢振武, 等. 基于偏折原理的太阳能槽式聚光器面形快速检测方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(12):

- 1208006.
- 17 Diver R B. Mirror alignment and focus of point-focus solar concentrators [C]. International Solar Energy Conference, Maui, 1994: 10193594.
 - 18 Ren Lanxu, Wei Xiudong, Niu Wenda, *et al.* Surface error of parabolic trough solar concentrators based on the theoretical overlay photographic method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0412001.
任兰旭, 魏秀东, 牛文达, 等. 基于吸热管反射成像法测量抛物槽式太阳能聚光器的面形误差 [J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0412001.
 - 19 Diver R B, Moss T A. Practical field alignment of parabolic trough solar concentrators [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2007, 129(2): 153-159.
 - 20 Ulmer S, Heller P, Reinalter W. Slope measurements of parabolic dish concentrators using color-coded targets [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2008, 130(1): 011015.
 - 21 颜 健, 彭佑多. 一种太阳能聚光器反射镜面调焦系统及调焦方法: CN105485940A [P]. 2016-04-13.
 - 22 Yan Jian, Peng Youduo, Cheng Ziran, *et al.* Moving accumulative computation method for flux distribution of heat absorber in symmetry concentrating solar collector system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0508001.
颜 健, 彭佑多, 程自然, 等. 对称型太阳能聚光集热系统吸热器能流分布的运动累加计算方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0508001.
 - 23 Liu Shugui, Li Peng, Na Yonglin. Evaluation of the form error of ellipse based on least square method [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, 23(4): 245-247.
刘书桂, 李 蓬, 那永林. 基于最小二乘原理的平面任意位置椭圆的评价 [J]. *计量学报*, 2002, 23(4): 245-247.