

一种基于视觉测量的大型碟式聚光器 镜面单元位姿调节方法

陈瑜¹, 彭佑多¹, 颜健¹, 余佳焕¹, 李诗晴¹, 王旻辉²

(1.湖南科技大学 机械设备健康维护省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 2.湘电集团太阳能事业部, 湖南 湘潭 411101)

摘要:根据大功率碟式聚光器镜面单元结构特点及在线安装过程中对镜面单元位姿快速检测、高效调节和精确定位的需要,提出了一种基于三目视觉测量和机器人辅助安装的镜面单元位姿调节方法.建立了任一镜面单元角点空间坐标方程,设计了镜面单元位姿调节系统结构,并明确了相应调节方法与步骤.以 38 kW 碟式聚光器为例,对镜面单元不同位姿进行了光学计算,分析了视觉测误差和镜面单元制造误差等因素对镜面单元位姿调节的影响.结果表明,基于视觉测量的调节方法,在不考虑其他误差情况时,当视觉测量误差和镜面单元制造误差的综合误差控制在 ± 2 mm 内,能满足镜面单元位姿调节精度要求.

关键词:碟式聚光器; 镜面单元; 位姿调节; 视觉测量

中图分类号:TK513.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2017)02-0027-08

Adjustment method of the large dish concentrator mirror unit based on the visual measurement

Chen Yu¹, Peng Youduo¹, Yan Jian¹, Yu Jiahuan¹, Li Shiqing¹, Wang Minhui²

(1.Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Xiangtan 411201, China;

2.The solar Department of Hunan Electric Group, Xiangtan 411101, China)

Abstract: According to the structural characteristics of high-power dish concentrator mirror unit, and online installation process which need the mirror unit rapidly detection, effectively regulation and accurately positioning. A mirror unit posture adjustment method was proposed which based on a trinocular vision measurement and auxiliary installation machine robots. Corner space coordinate equation of any mirror unit was established and mirror unit posture control system structure was designed, at the same time, the corresponding adjustment methods and steps were determined. Taken the 38 kW dish system as an example, the position of different mirror unit was calculated and the influence of the measurement error and manufacturing error was analyzed on the mirror unit. The result shows that the adjustment method which based on visual measurement, when do not consider the other error and the visual measurement error and manufacturing error Controlled within ± 2 mm, can fit the adjustment precision requirements. of the mirror unit.

Keywords: dish concentrator; mirror unit; position adjustment; visual measurement

碟式聚光器反射镜面为旋转抛物面,在现有技术条件下抛物镜面难以整体制造,因此,采用镜面单元拼接而成;实际工程中,镜面单元的安装仍然采用人工目测的方法调焦,镜面单元安装误差较大,从而导致聚光器聚焦光斑的能量不均、聚焦光斑大、光斑部分脱靶等现象,严重时的还会产生“热点”,使热管烧蚀

损坏.目前,国内外专家对碟式聚光器反射镜面的检测进行了相关研究;Jones等^[1-4]研制了基于激光光线追踪视频扫描Hartmann检测仪(VSHOT),用于测量碟式聚光器反射镜面的斜率误差.Ulmer等^[5]在碟式聚光器焦点处放置彩色条纹平面,再利用安放在距离聚光器约两倍聚焦距处的相机拍摄照片,通过特定的算法求得反射镜面上点的法向.颜健等^[6-7]提出将镜面单元安装误差等效为刚体的空间旋转运动,引入聚光器结构特征、镜面单元安装误差等因素,对碟式聚光器聚焦进行了研究分析;王云峰等^[8]采用光线追踪法对影响碟式太阳能聚光特性的几何因素进行了分析和比较;兰维等^[9]针对碟式聚光系统调焦提出对日调焦、成像原理调焦以及影像系统调焦等几种方法;但这些研究对现实镜面单元的快速精准安装指导作用不突出.因此,文章提出一种利用三目视觉对镜面单元位姿进行快速测量,机械手快速调节和精准定位的方法,对提高镜面安装精度和效率具有重要理论意义和应用价值.

1 镜面单元空间位姿描述

大型聚光器受镜面成型工艺的限制而难以整体制造,目前一般采用多镜面单元的拼接结构.如图1所示,以聚光器抛物镜面顶点建立聚光器坐标系 $OXYZ$ (Z 轴指向焦点),将反射镜采光区域沿 OXY 平面投影并进行镜面单元的划分和编号,聚光器镜面沿周向等夹角 β 划分为 i 份,沿径向划分为 j 份,考虑镜面单元安装调整以及有效减小风载荷而留有缝隙 d ,以及满足聚光机架实现双轴驱动要求而设计的空域(半径为 R_1)和缺角 θ ^[2].

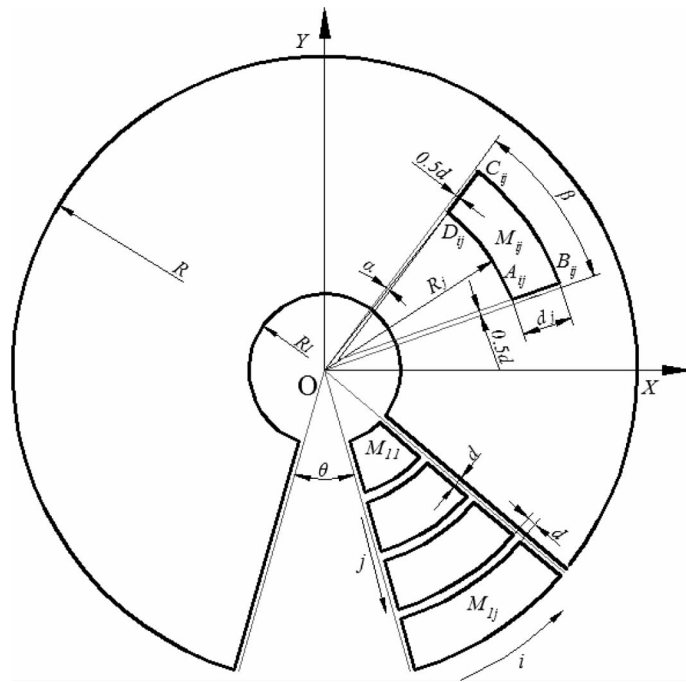


图1 镜面单元划分

反射镜面抛物曲面方程为 $x^2+y^2=4fz$,理想情况镜面单元 M_{ij} 的各角点空间坐标为

$$N_{ij} = (x_{N_{ij}}, y_{N_{ij}}, z_{N_{ij}}) = \left(R_{N_{ij}} \cos \xi_{N_{ij}}, R_{N_{ij}} \sin \xi_{N_{ij}}, \frac{R_{N_{ij}}^2}{4f} \right). \quad (1)$$

式中: N 代表镜面单元角点 $A \sim D$; $R_{N_{ij}}$ 为角点 N_{ij} 所在圆环的半径; $\xi_{N_{ij}}$ 为直线 $N_{ij}O$ 与 X 轴正向的夹角; f 为抛物曲面的焦半径,式(1)的具体参数满足:

$$R_j = \begin{cases} R_1 + (j-1)d + \sum_{n=1}^{j-1} d_n, & j > 1; \\ R_1, & j = 1. \end{cases} \quad (2)$$

$$\xi_{A_{ij}} = \frac{3\pi}{2} + \frac{\theta}{2} + (i-1)\beta + \arcsin \frac{d}{R_{A_{ij}}}. \quad (3)$$

$$\xi_{Bij} = \frac{3\pi}{2} + \frac{\theta}{2} + (i-1)\beta + \arcsin \frac{d}{R_{Bij}}. \quad (4)$$

$$\xi_{Cij} = \frac{3\pi}{2} + \frac{\theta}{2} + (i-1)\beta - \arcsin \frac{d}{R_{Cij}}. \quad (5)$$

$$\xi_{Dij} = \frac{3\pi}{2} + \frac{\theta}{2} + (i-1)\beta - \arcsin \frac{d}{R_{Dij}}. \quad (6)$$

$$R_{Aij} = R_{Dij} = R_j. \quad (7)$$

$$R_{Bij} = R_{Cij} = R_j + d_j. \quad (8)$$

镜面单元理论位姿坐标系 $O_{sij}X_{sij}Y_{sij}Z_{sij}$ 是基于理论镜面单元4个角点构建的,如图2所示.

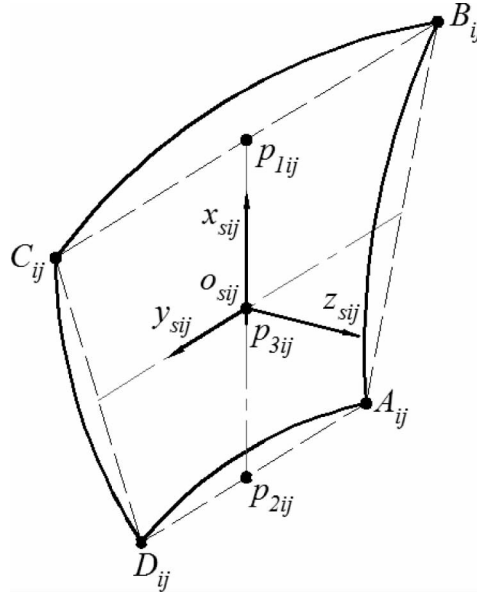


图2 镜面单元位姿坐标系

曲面 $A_{ij}B_{ij}C_{ij}D_{ij}$ 表示编号为 M_{ij} 镜面单元,点 P_{1ij}, P_{2ij} 分别为直线 $B_{ij}C_{ij}, A_{ij}D_{ij}$ 的中点,坐标系 $O_{sij}X_{sij}Y_{sij}Z_{sij}$ 以直线 $P_{1ij}P_{2ij}$ 的中点 P_{3ij} 为原点, X_{sij} 轴平行于直线 $P_{3ij}P_{1ij}$, Z_{sij} 轴方向为平面 $P_{1ij}A_{ij}D_{ij}$ 的法向,则由式(1)可以求得坐标系 $O_{sij}X_{sij}Y_{sij}Z_{sij}$ 在聚光器坐标系 $OXYZ$ 下的原点 O_{sij} 坐标,以及 $X_{sij}, Y_{sij}, Z_{sij}$ 各轴的方向向量 u_{ij}, v_{ij}, w_{ij} .

$$O_{sij} = (X_{osij}, Y_{osij}, Z_{osij}) = \left(\frac{x_{Tij}}{4}, \frac{y_{Tij}}{4}, \frac{z_{Tij}}{4} \right). \quad (9)$$

式中: $E_T = E_{Aij} + E_{Bij} + E_{Cij} + E_{Dij}$; E 代表 x, y, z ;

$$\begin{cases} u_{ij} = [X_{uij}, Y_{uij}, Z_{uij}]^T = \frac{1}{2} [X_C, Y_C, Z_C]^T; \\ v_{ij} = [X_{vij}, Y_{vij}, Z_{vij}]^T = u_{ij} \times w_{ij}; \\ w_{ij} = [X_{wij}, Y_{wij}, Z_{wij}]^T = [Y_F Z_L - Z_F Y_L, Z_F X_L - X_F Z_L, X_F Y_L - Y_F X_L]^T. \end{cases} \quad (10)$$

式中: $E_C = 0.5(E_{Bij} + E_{Cij}) - E_{osi}$; $E_F = 0.5(2E_{Dij} - E_{Bij} - E_{Cij})$; $E_L = 0.5(2E_{Aij} - E_{Bij} - E_{Cij})$; E 分别代表 x, y, z .

由式(9)和式(10)可得镜面单元理论位置坐标系 $O_{sij}X_{sij}Y_{sij}Z_{sij}$ 和聚光器坐标系 $OXYZ$ 的转换式^[10]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{uij}}{|u_{ij}|} & \frac{x_{vij}}{|v_{ij}|} & \frac{x_{wij}}{|w_{ij}|} \\ \frac{y_{uij}}{|u_{ij}|} & \frac{y_{vij}}{|v_{ij}|} & \frac{y_{wij}}{|w_{ij}|} \\ \frac{z_{uij}}{|u_{ij}|} & \frac{z_{vij}}{|v_{ij}|} & \frac{z_{wij}}{|w_{ij}|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{sij} \\ y_{sij} \\ z_{sij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{osij} \\ y_{osij} \\ z_{osij} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

2 镜面单元位姿调节系统

2.1 调节系统构成及原理

图3所示是基于视觉测量的镜面单元调节系统构成示意图,调节系统由六自由度机器人、3台 CCD 相机、图像采集卡及计算机等构成。3台 CCD 相机固定安装在机械人上方,并使机器人位于3台相机的共同视场内,镜面单元则安放在机器人末端法兰盘上。

为了方便阐述和分析,文章假设摄像机世界坐标系与聚光器坐标系重合,如图3所示, C_w 表示聚光器抛物面坐标系; C_{sij} , C_{rij} 分别表示镜面单元理论位姿坐标系和实际测得镜面单元位姿坐标系, C_{sij} 是基于理论位姿镜面单元4个角点所构建, C_{rij} 则是基于测得的镜面单元4个角点所构建; C_{ci} ($i=1,2,3$)表示摄像机坐标系,通过标靶标定; C_b 表示机器人基坐标系, C_h 表示机器人末端坐标系, $C_{h'}$ 表示机器人末端目标位姿坐标系。 R_{sw} 表示镜面单元理论位姿坐标系与聚光器坐标系的转换矩阵, R_{rw} 表示实际镜面单元位姿坐标系与聚光器坐标系的转换矩阵, R_{ciw} ($i=1,2,3$)表示相机坐标系与聚光器坐标系的转换矩阵, R_{bw} 表示机器人基坐标系与聚光器坐标系的转换矩阵, R_{hb} 表示机器人末端坐标系与机器人器基坐标系的转换矩阵, R_{rh} 表示实际镜面单元位姿坐标系与机器人器末端坐标系的转换矩阵, $R_{h'b}$ 表示机器人末端目标位姿坐标系与机器人器基坐标系的转换矩阵。

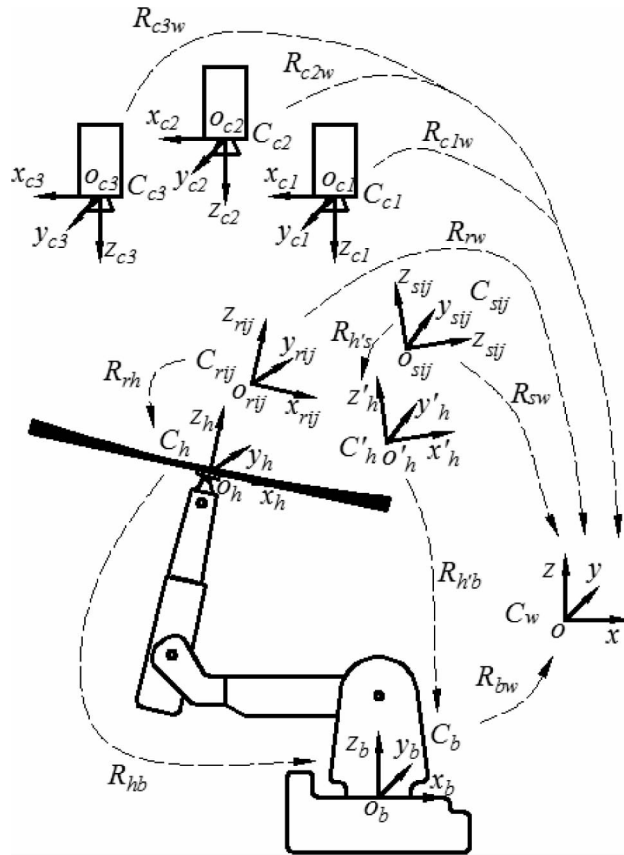


图3 基于视觉测量的镜面单元调节系统

镜面单元位姿调节分3步完成:第一步,设定聚光器坐标系,即设定相机世界坐标系;标定摄像机内参数,确定相机之间的转换关系;标定机器人坐标系,确定机器人坐标系与聚光器坐标系之间的转换关系。第二步,利用相机对安放在机器人末端的镜面单元角点进行拍摄,将采集到的图片进行处理,计算得到镜面单元在聚光器坐标系中的实际位姿和计算机器人末端的调节量,并控制机器人对镜面单元进行位姿调节。第三步,保持镜面单元位姿状态,则将镜面单元固定在聚光器骨架上。

2.2 镜面单元位姿三目视觉测量

双目视觉的难度在于特征点的匹配,而三目视觉利用3台相机从不同角度对物体摄像,相当于增加了

一个几何约束,从而可以获得唯一的被测点的空间坐标.如图4所示,假设物点 P 为镜面单元一角点,用3台摄像机从不同角度观察,它在 C_{c1}, C_{c2}, C_{c3} 3台摄像机上图像点分别为 P_1, P_2, P_3 ,由于误差的存在 $O_{c1}P_1, O_{c2}P_2, O_{c3}P_3$ 3线两两相交,交点为 P_4, P_5, P_6 .

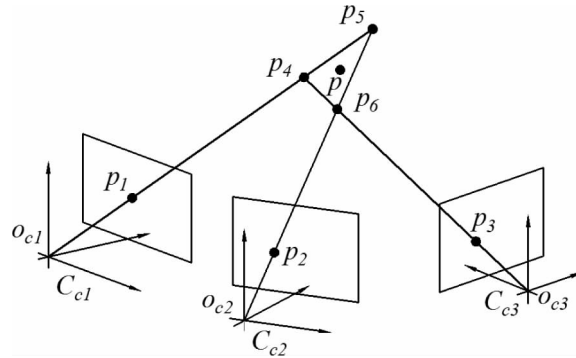


图4 3台摄像机观测空间点示意图

假定空间任意点 P 在3台摄像机 C_{c1}, C_{c2}, C_{c3} 上的图像点 P_1, P_2, P_3 已经从3个图像中分别检测出来,即已知 P_1, P_2, P_3 为空间同一点的对应点,另外,3台摄像机已经标定,则它们的投影矩阵分别为 M_1, M_2, M_3 ,则相机模型为

$$z_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$z_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 & m_{13}^2 & m_{14}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 & m_{23}^2 & m_{24}^2 \\ m_{31}^2 & m_{32}^2 & m_{33}^2 & m_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$z_3 \begin{bmatrix} u_3 \\ v_3 \\ 1 \end{bmatrix} = M_3 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^3 & m_{12}^3 & m_{13}^3 & m_{14}^3 \\ m_{21}^3 & m_{22}^3 & m_{23}^3 & m_{24}^3 \\ m_{31}^3 & m_{32}^3 & m_{33}^3 & m_{34}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

式中: $(u_1, v_1, 1), (u_2, v_2, 1), (u_3, v_3, 1)$ 分别为 P_1, P_2 与 P_3 点在各自图像中的像素图像齐次坐标; $(x, y, z, 1)$ 为 P 点在世界坐标系下的齐次坐标.

式(12)和式(13)分别包含3个方程,消去 z_1, z_2, z_3 后,可以得到关于 x, y, z 的6个线性方程,利用最小二乘法求解点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 的唯一解,其中 $(i=4, 5, 6)$;点 $P(x, y, z)$ 的最优估计值则可表示为

$$[x, y, z] = \frac{1}{3} \left[\sum_4^6 x_i, \sum_4^6 y_i, \sum_4^6 z_i \right]. \quad (15)$$

2.3 镜面单元位姿调节算法

机器人是通过控制其末端的运动对镜面单元位姿进行调节的,因此,调节时需求得机器人末端目标位姿坐标系 C_h ,在机器人基坐标系 C_b 中的姿态,即坐标系 C_h 与坐标系 C_b 的转换矩阵 $R_{h,b}$,以下将推导 $R_{h,b}$ 的求解过程.

利用DH表示法对机器人进行建模^[11],则第 i 个与第 $i-1$ 个坐标系间的传递矩阵可表示为

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

式中: a_i 为连杆的长度; α_i 为连杆的扭角; θ_i 为关节的变量角; d_i 为连杆的偏置量.

机器人各关节处的连杆长度、连杆的扭角、关节的变量角和连杆的偏置量等参数可通过标定得到,因此由式(16)可知,对于6个关节的串联机器人,其末端坐标系与基坐标系的传递矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_{hb} = \prod_{i=1}^6 \mathbf{A}_i. \quad (17)$$

假设由上述三目视觉测量方法测得镜面单元角点 N_{ij} (N 表示 A, B, C, D)在聚光器坐标系 $OXYZ$ 中标为 $(x_{N_{ij}}, y_{N_{ij}}, z_{N_{ij}})$,将角点 N_{ij} 各坐标值代入式(9)~式(11)即可求得镜面单元实际位姿坐标系 C_{rij} 在聚光器坐标系 C_w 下的坐标原点和各轴方向向量,以及坐标系 C_{rij} 与坐标系 C_w 的转换矩阵 \mathbf{R}_{rw} ;镜面单元实际位姿坐标系 C_{rij} 与机械末端坐标系 C_h 换矩阵则可表示为

$$\mathbf{R}_{rh} = \mathbf{R}_{rw} \mathbf{R}_{bw}^{-1} \mathbf{R}_{hb}^{-1}. \quad (18)$$

假设机器人将镜面位姿调节到理论位置坐标系 C_{sij} ,机器人末端对应的的坐标系为 $C_{h'}$,由于镜面单元与机器人末端固联,可知坐标系 C_{rij} 与坐标系 $C_{h'}$ 的相对姿态不变,有 $\mathbf{R}_{h'b} = \mathbf{R}_{rh}$;坐标系 $C_{h'}$ 的在机器人基坐标系 C_b 的位姿可表示为

$$\mathbf{R}_{h'b} = \mathbf{R}_{rh} \mathbf{R}_{sw} \mathbf{R}_{bw}^{-1}. \quad (19)$$

3 镜面单元位姿调节系统精度要求分析

镜面单元位姿调节精度主要受机械手调节误差、视觉测量误差、镜面单元制造误差的影响.目前,机械手的重复定位精度普遍可以达到0.1 mm,绝对定位精度一般为2~3 mm,机器人的绝对定位精度不高主要由于机器人在制造和安装过程中产生的关节实际几何参数与理论参数之间存在偏差造成的;文献[12]采用激光跟踪仪对机器人位姿进行精确测量,标定后机器人的定位精度可达到0.5 mm.视觉测量误差和镜面单元制造误差都将导致测量得到的镜面单元角点坐标偏离理论位置,使建立的镜面单元坐标系存在一定偏差,最终导致整个镜面单元调节计算产生偏差.以下将以38 kW聚光器为例,分析镜面单元位姿误差对聚焦的影响,以及视觉测量误差和镜面单元制造误差对镜面单元位姿调节的影响,并验证调节系统的可行性.

3.1 镜面单元位姿误差对聚焦的影响

以38 kW聚光器为例,其抛物曲面方程为 $x^2 + y^2 = 4fz$,焦半径 $f = 9\,490$,空域半径 R_1 为900 mm,开口半径 R 为8 850 mm,缺角 θ 为30°,镜面沿径向以1 350 mm等距划分成6环,由内向外,第1环按等夹角30°均等划分,第2~第4环按等夹角15°划分,第5和第6环按等夹角7.5°划分,镜面单元之间的缝隙 d 为20 mm,取聚光器上最内侧镜面单元M11和最外侧镜面单元M16的为研究对象.

镜面单元位姿调节误差由空间位置平移误差和位姿角度误差组成,空间位置平移误差相对斯特能热机接收器口径是较小的,因此,平移误差对镜面单元焦点位置的影响是较小的,因此,文章主要针对镜面单元位姿角度误差进行分析研究.基于Matlab平台对镜面单元不同位姿进行光学计算,步骤如下:

第一步,将聚光器各参数代入式(1),计算得到镜面单元各角点坐标,确定各角点处抛物曲面内法线向量,再将坐标值代入式(9)~式(11),确定镜面单元坐标系 $O_{sij}X_{sij}Y_{sij}Z_{sij}$ 聚光器坐标系 $OXYZ$ 之间的转换关系,即确定坐标系 $O_{sij}X_{sij}Y_{sij}Z_{sij}$ 的原点坐标以及各轴方向向量.

第二步,计算不同位姿的镜面单元各角点的法向量.镜面单元位姿设计成:镜面单元分别单独绕镜面单元坐标系 $O_{sij}X_{sij}Y_{sij}Z_{sij}$ 各轴旋转一定角度,旋转角度区间为 $-0.3^\circ \sim 0.3^\circ$,步长为 0.05° .

第三步,基于边缘光线理论,以镜面单元各角点的反射光点(反射光线与焦平面交点)为分析对象;基于Matlab平台和Fresnel定律对不同位姿的镜面单元进行光学计算,求得不同位姿镜面单元各角点的反射光点与焦点距离.

图(5)和图(6)分别为镜面单元W11, W16不同位姿各角点的反射光点与焦点距离分布图,从图中结果可以看出,镜面单元W11所有反射光点基本位于半径为100 mm的圆区域内,镜面单元W16所有反射光点基本位于半径为200 mm的圆区域内;镜面单元位姿偏转角度相同的情况下,聚光器外侧镜面单元反射光点位置的变化幅度较大,镜面单元各角点反射光点之间距离变化也较大.基于38 kW斯特林热机接收

器口径为 400 mm,因此,在不考虑太阳光光线夹角的情况下,镜面单元在上述角度变化范围内满足聚光要求.

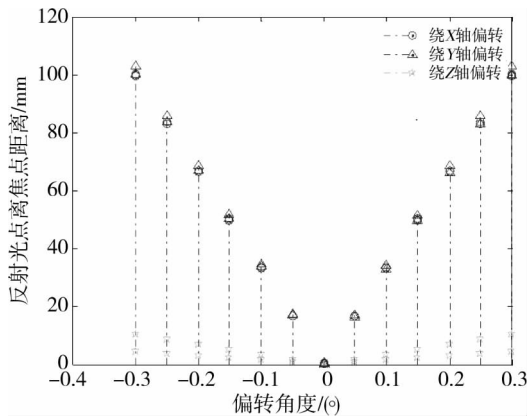


图 5 镜面单元 W11 不同位姿光学计算结果图

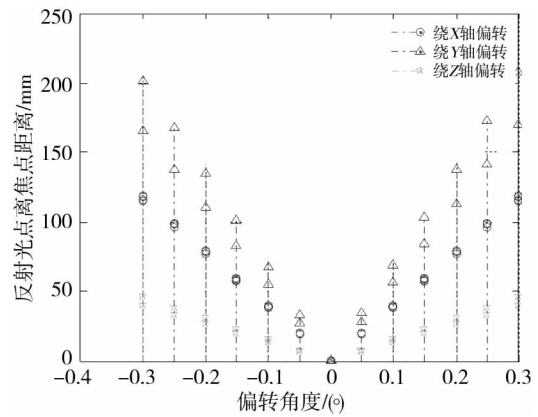


图 6 镜面单元 W16 不同位姿光学计算结果图

3.2 测量误差和制造误差对镜面单元位姿调节的影响

测量误差导致测量到的镜面单元角点偏离实际角点,镜面单元制造误差导致镜面单元实际角点偏离理论角点,由式(9)和式(10)可知,两种误差均将导致建立的镜面单元实际位姿坐标系 $O_{rij}X_{rij}Y_{rij}Z_{rij}$ 存在偏差;由式(19)和式(20)可知,镜面单元实际位姿坐标系偏差将导致镜面单元调节产生误差.将上述 2 种误差看成是镜面单元角点偏移误差,即假设各角点在镜面单元坐标系下沿 $X_{sij}, Y_{sij}, Z_{sij}$ 轴方向分别偏移了 r, s, t ,记 r, s, t 的最大取值范围为 ε .

同样以 38 kW 聚光器上镜面单元 W11 和镜面单元 W16 为分析对象,分 3 种情况分析角点偏移误差对镜面单元位姿角度误差的影响: $r=0$ 时, s, t 随着 ε 值变化镜面单元坐标系绕 X_{sij} 偏转最大角度 α ; $s=0$ 时, r, t 随着 ε 值变化镜面单元坐标系绕 Y_{sij} 偏转最大角度 β ; $t=0$ 时, r, s 随着 ε 值变化镜面单元坐标系绕 Z_{sij} 偏转最大角度 γ .

分析结果如图 7,图 8 所示,角点偏差范围 ε 为 ± 2 mm 时,镜面单元 W11 最大偏转角 α 范围约为 $-0.31^\circ \sim 0.31^\circ$;最大偏转角 β 和 γ 变化接近,范围约为 $-0.21^\circ \sim 0.21^\circ$.镜面单元 W16 最大偏转角 α 范围约为 $-0.22^\circ \sim 0.22^\circ$,最大偏转角 β 和 γ 变化接近,范围约为 $-0.17^\circ \sim 0.17^\circ$.

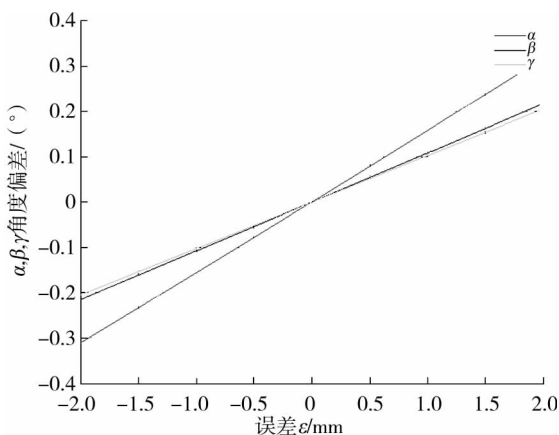


图 7 镜面单元 W11 最大位姿角偏差

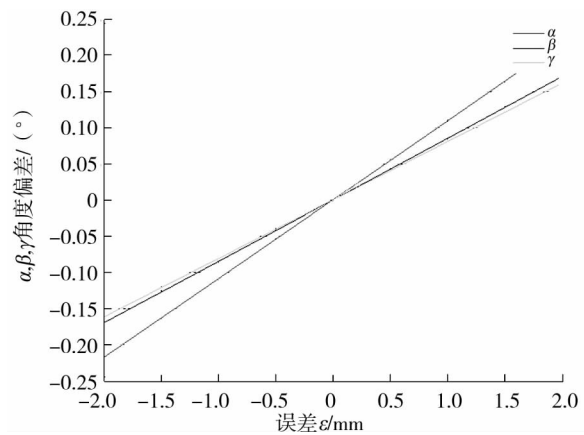


图 8 镜面单元 W16 最大位姿角偏差

4 结论

通过对镜面单元空间理论位置的分析,提出一种基于视觉测量的镜面单元位姿调节安装方法,建立了调节系统模型,并确定调节算法.以 38 kW 碟式聚光器为例,确定镜面单元位姿精度要求,分析了视觉测量误差和镜面单元制造误差对镜面单元位姿调节的影响,从结果可以看出,镜面单元位姿沿各轴偏转角范围

在 $-0.3^{\circ}\sim 0.3^{\circ}$ 内能满足聚光器聚焦性能要求,在不考虑机器人调节误差和太阳光夹角的情况下,视觉测量和镜面单元制造误差需控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 内。

参考文献:

- [1] Jones S A, Neal D R, Gruetzner J K, et al. VSHOT: a tool for characterizing large, imprecise reflectors[R]. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States), 1996.
- [2] Jones S A. VSHOT measurements of distal II dish concentrators[R]. Sandia National Lab., Albuquerque, NM (US), 1999.
- [3] Jones S A, Gruetzner J K, Houser R M, et al. VSHOT Measurement uncertainty and sensitivity study[R]. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States), 1997.
- [4] Wendelin T, May K, Gee R. Video scanning hartmann optical testing of state-of-the-art parabolic trough concentrators[C]// ASME 2006 International Solar Energy Conference, American Society of Mechanical Engineers, 2006: 699-707.
- [5] Ulmer S. Slope measurements of parabolic dish concentrators using color-coded targets[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2008, 130(2):555-567.
- [6] 颜健,彭佑多,肖蓉,等.基于结构特征及镜面单元安装误差的碟式聚光器聚焦分析[J].光学技术,2014,40(6):508-514.
- [7] 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.
- [8] 王云峰,季杰,何伟,等.抛物碟式太阳能聚光器的聚光特性分析与设计[J].光学学报,2012,32(1):198-205.
- [9] 兰维,刘晓光.碟式斯特林太阳能热发电系统聚热器调焦方法[J].发电与空调,2015,36(2):17-20.
- [10] 王保丰,徐宁,余春平,等.两种空间直角坐标系转换参数初值快速计算的方法[J].宇航计测技术,2007,27(4):20-24.
- [11] 龚星如,沈建新,田威,等.工业机器人的绝对定位误差模型及其补偿算法[J].南京航空航天大学学报,2012,44(B04):60-64.
- [12] 杨丽红,秦绪祥,蔡锦达,等.工业机器人定位精度标定技术的研究[J].控制工程,2013,20(4):785-788.