

太阳能聚光器镜面单元的支撑-调节结构和位姿校准

颜 健¹, 彭佑多¹, 程自然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 为了实现聚光器镜面单元安装误差的快速校准,设计了一种螺纹副与球铰副组合的镜面单元支撑-调节结构,该结构可以实现调节量的准确控制。提出了镜面单元位姿(轴线矢量和顶点位置)的快速测量方法和轴线矢量位姿误差的定量校准方法。首先,应用摄影测量方法确定镜面单元表面的 3 个特征点(构成三角形)坐标,建立镜面单元位姿、球铰中心与特征点坐标三者关联的数学模型,实现镜面单元位姿的快速测量。然后,结合镜面单元的调焦过程,提出“三转一移”刚体运动(3 次绕轴旋转和 1 次平移)来等效镜面位姿误差,建立镜面单元位姿与螺栓调节量的关联模型,实现镜面单元轴线矢量误差的定量校准。通过 SolidWorks 软件建立的虚拟调焦实验和室内的金属平板位姿调节实验,验证了本设计的镜面单元支撑-调节结构的便捷性,以及轴线矢量定量校准方法的有效性。提出的镜面单元校准方法不受反射镜几何形状的限制,具有广泛的适用性。

关键词 光学设计; 太阳能; 聚光器; 安装误差; 校准方法; 镜面支撑结构; 摄影测量方法

中图分类号 TK513.1; TH115 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0522001

Solar Concentrator Mirror Unit Supporting-Adjusting Structure and Posture Alignment

Yan Jian¹, Peng Youduo¹, Cheng Ziran¹, Tan Xinhua²

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

²The Solar Business Department, Xiangtan Electric Manufacturing Group, Xiangtan, Hunan 411101, China

Abstract In order to achieve fast error alignment in concentrator mirror unit installation, a mirror unit supporting-adjusting structure consists of threaded vice and ball joint is designed to precisely control the adjusting amount. A fast measurement method of mirror unit posture (axis vector and vertex position) and a quantitative alignment method of axis vector posture error are proposed. Firstly, the photogrammetry method is applied to determine the three feature points (construct a triangle) coordinates in the mirror unit surface. Then, an association mathematical model of the ball joint center coordinates, the mirror unit posture, and the feature points coordinates is established to achieve fast measurement of the mirror unit posture. After that, combined with the mirror unit alignment process, we propose the “three rotational-one moving” rigid body motion (three rotate around axis and one moving) to equate the mirror posture error. The mirror unit posture associated with the bolt adjusting quantity model is established to achieve the quantitative alignment of mirror unit axis vector error. Finally, the convenience of the mirror unit supporting-adjusting structure and the effectiveness of the axis vector quantity alignment method are verified by the virtual alignment experiment established by SolidWorks software and metal flat surface posture alignment experiment in

收稿日期: 2016-11-11; **收到修改稿日期:** 2017-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(51641504, 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

door. The proposed mirror unit alignment method is not restricted by the reflector geometry and it has extensive applicability.

Key words optical design; solar energy; concentrator; installation error; alignment method; mirror supporting structure; photogrammetry method

OCIS codes 220.4840;350.6050;350.4600

1 引 言

聚光器是实现太阳光能定向传输与聚集的光学装置,是太阳能光热发电系统的重要装备^[1-2]。聚光器的高效聚能源于镜面的特定反射曲面形状,而大型聚光器一般是由若干镜面单元拼接而成^[3],其光学性能取决于镜面单元的面形精度和安装精度。任何环节的误差均会影响聚光器的整个服役周期,因此对光热电站的经济性能影响显著^[4]。然而,聚光器钢架结构的制造和安装精度远无法满足光学精度要求,镜面单元安装后的调节(位姿校准,也称镜面调焦)不可避免^[5-6],也是太阳能光热电站建设中必须解决的共性问题。寻求高效率、高精度的镜面单元定量调节方法及调节结构是聚光器建设的关键,也是缩短聚光器安装周期和降低聚光器建设成本的重要途径^[7]。

当前,用于检测聚光器的面形精度或指导镜面单元安装的方法主要有激光扫描法、摄影测量法和反射成像法等^[8]。激光扫描法^[9-11]的本质是光线跟踪方法,通过投射大量的光线或大范围地扫描反射镜面(较为耗时),获知反射镜面的微观面形误差^[12],或评估聚光器的拼接面形精度。激光扫描法理论上可实现镜面位姿校准的指导,但实际操作时较难具有“实时”性。摄影测量法方面,Burgess等^[13]在建造SG4 500 m²碟式聚光器时,采用摄影测量法对成型抛物曲面桁架的夹具进行了标定。Xiao等^[14]采用摄影法测量了直径为9.5 m的碟式聚光器面形精度,用于指导镜面单元的安装与调整,但未能将镜面位姿误差与支撑螺杆调节量进行定量的关联。本质上来讲,摄影测量方法能测量任意形状镜面单元的面形和位姿精度^[15-17],可以指导镜面的安装与校准。但大面积粘贴标志点会污染反射镜面,因此需发展镜面位姿测量的“清洁”摄影测量方法(减少标志的数量)。反射成像法方面,碟式聚光器的面形检测是在反射镜的前方特定位置放置彩色图案的平面靶,并用相机从其后方一定距离观看聚光器镜面的彩色图案,根据彩色图案的分布来获知反射镜的面形精度^[18-20]。此方法需确保相机的光轴与聚光器的焦轴重合,且相机安装在远大于焦距^[20]或2倍焦距^[18-19]的位置,操作上存在较大困难。此外,彩色图案的分布特征与镜面单元的位姿关系还未理清,作为镜面调焦的定量指导方法还有待发展和完善。槽式系统拥有天然的反射特征——吸热管,从而将反射成像法发展成吸热管反射法。反射成像法能够测量槽式聚光器镜面的拼接误差和面形微观误差等^[21-23],但仍停留在定性地指导镜面调整或聚光器光学性能的检测与评估方面,未能真正地实现镜面校准的“实时”定量指导。

先前的研究主要集中在聚光器反射镜面形误差的检测与评估方面,对镜面位姿误差与支撑结构调节量之间的定量关系研究较少,还停留在定性的镜面调焦阶段。本文采用一种螺纹副结合球铰副组合的镜面单元新支撑-调节结构,提出了镜面位姿快速测量方法和镜面轴线矢量误差的定量校准方法。通过SolidWorks平台的虚拟调节实验和室内的金属平板位姿校准实验,验证了新支撑-调节结构的快捷性以及镜面单元轴线矢量误差的定量校准方法的有效性。

2 镜面单元的支撑-调节结构

图1(a)是38 kW碟式-斯特林发电系统,建造在湘电集团的厂区内。抛物聚光器(直径17.70 m,焦距9.49 m)是由164块镜面单元拼接而成。每块镜面单元通过3个或4个螺杆固定在网架的连接板上,并通过调节各螺杆来调节镜面位姿。镜面单元的支撑-调节结构实物如图1(b)所示,其装配模型如图1(c)所示。支撑-调节结构主要由螺杆、球铰垫片组(凸球面垫片和凹球面垫片,两者形成球铰副)和螺母等组成。螺杆的上端设有球体,此球体与镜面单元背部的球凹面配合形成球铰副连接(球铰副的中心简称球铰中心)。螺杆穿过连接板的通孔,螺杆的上下两侧依次安装有球铰垫片组和螺母,拧紧两侧的螺母就可固定此螺杆及球铰中心。

在38 kW碟式聚光器的镜面安装与调节过程中,图1(b)所示的支撑-调节结构暴露出一些不足,主要

有:调焦时需要人工支撑镜面单元或螺杆,其调焦过程的劳动强度大(镜面尺寸一般在 2 m^2 左右);通过人工移动螺杆来调节镜面位姿时,螺杆会在通孔中偏转或倾斜,较难控制螺杆的调节量。为此,本研究提出一种螺纹副结合球铰副组合的镜面单元支撑-调节结构,其装配模型如图 2(a)所示。球头螺杆下段的外螺纹与套筒螺杆上段的螺纹孔连接,套筒螺杆中部的球体与安装座采用球铰副连接。将套筒螺杆上下两侧的螺母锁紧,就能固定此支撑-调节结构。图 2(b)是螺母全部松开时镜面单元的支撑示意图,此时是一个可运动的机构。当全部螺母锁紧时(即镜面单元安装完成),套筒螺杆中部的球铰副就变成固定连接,则图 2(b)的机构是不可动的结构。此时,可通过依次调节各球头螺杆的伸缩量来完成镜面位姿的校准。以支撑 3 的调节为例来说明:将支撑 3 套筒螺杆两侧的螺母小幅度拧松(支撑 1 和支撑 2 保持固定);套筒螺杆固定并转动球头螺杆,实现球头螺杆的伸缩运动。此时镜面单元会绕轴线 AB 转动,即可实现镜面位姿的改变;调节到合适位置后再锁紧套筒螺杆两侧的螺母。按照上述步骤,依次控制支撑 3、支撑 2 和支撑 1 的球头螺杆伸缩距离,就可完成镜面位姿的校准。当然,要实现镜面位姿的高效和准确的校准,关键是确定各球头螺杆的伸缩量,这是本实验的研究重点。

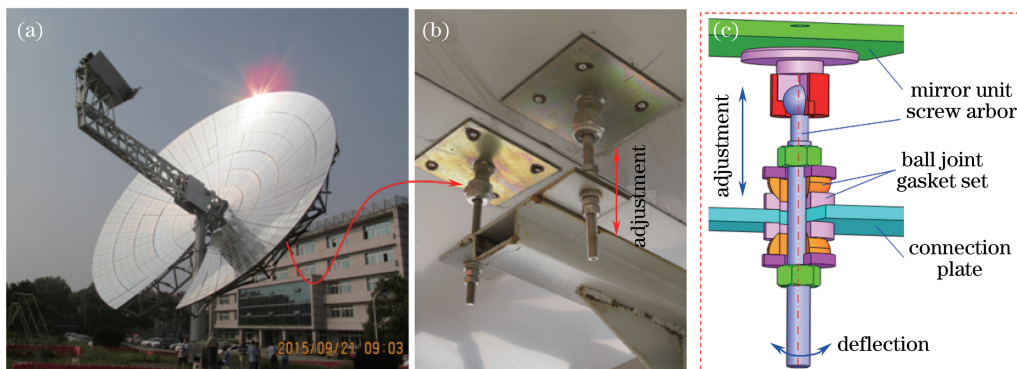


图 1 (a) 38 kW 碟式/斯特林太阳能光热发电系统; (b) 镜面单元的支撑-调节结构; (c) 装配图
Fig. 1 (a) 38 kW dish/Stirling solar-electric power system; (b) mirror unit supporting-adjusting structure; (c) assembly drawing

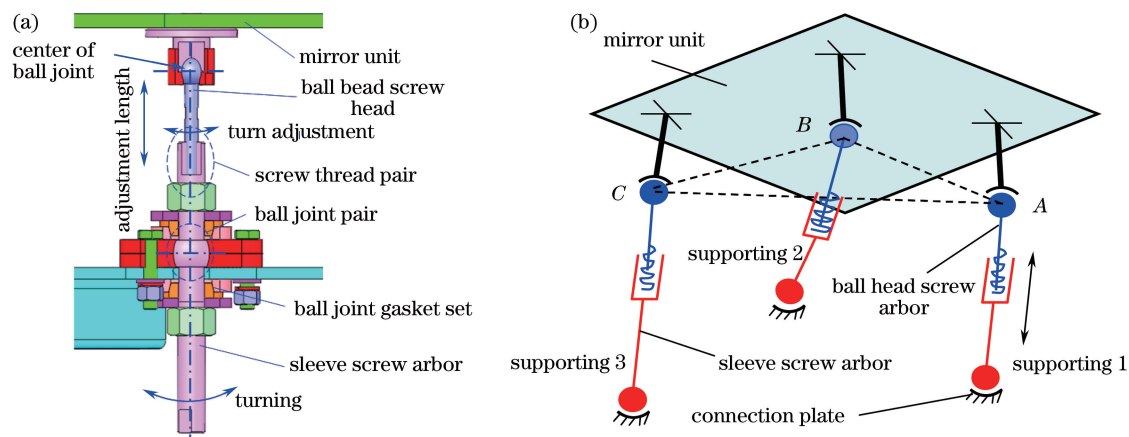


图 2 (a) 螺纹副结合球铰副组合的支撑-调节结构装配图; (b) 螺母全松开时, 镜面单元支撑-调节的机构示意图
Fig. 2 (a) Assembly drawing of supporting-adjusting structure with screw part and ball joint pair; (b) sketch map of the mirror unit supporting-adjusting structure when the nuts are full released

镜面单元的新支撑-调节结构增加了螺纹副和球铰副,在调焦过程中不需要人工支撑镜面单元(套筒螺杆中部的球体起到支撑作用),还可以将球头螺杆伸缩量转换为其转动角度。当配置相应的电动工具时,可以根据球头螺杆的螺距对伸缩量进行准确控制,从而有效地降低聚光器镜面安装的施工周期及成本。此外,对于支撑-调节结构固定后的承载能力而言,图 2(a)与图 1(b)的结构差异仅在于前者有 1 个螺纹连接(球头螺杆与套筒螺杆),由于镜面单元的自重和风载荷一般较小,此螺纹连接足以支撑镜面单元。

3 镜面单元的定量调节方法

镜面单元位姿校准过程的本质是系列刚体运动的组合,可通过支撑 1~支撑 3 中球头螺杆调节量的合理组合来实现镜面位姿的校准。本研究提出一种镜面单元位姿的快速测量和误差定量校准方法,整体思路是:1)由 3 个特征点的空间坐标反演镜面单元的空间位姿,即通过摄影测量方法^[24]确定镜面 3 个特征点的空间坐标。基于刚体运动理论,建立镜面位姿、球铰中心坐标与特征点空间坐标的关联模型,实现镜面位姿的快速测量,具体见 3.1 节;2)基于刚体运动理论和刚体运动的可逆性,将镜面单元的次安装位姿看做是镜面单元从理想位姿经过 3 次绕轴转动和 1 次平移运动到达的,于是就可以按相反的运动顺序来校准轴线矢量的位姿误差,具体见 3.2 节。

3.1 镜面单元的位姿测量

如图 3 所示,在聚光器设计坐标系 $O\text{-}xyz$ 中,镜面单元球铰中心 $A\sim C$ 的位置矢量分别为 $\mathbf{A}\sim\mathbf{C}$ 。镜面单元的位姿参数采用轴线矢量 \mathbf{N}_0 和顶点 Q 的位置矢量 \mathbf{Q} 来表征,选取原则是能确定镜面单元在聚光器中的唯一位姿。例如,镜面是抛物面时,点 Q 与原点 O 重合, \mathbf{N}_0 与 z 轴重合(F 是抛物曲面的焦点)。镜面是平面时, \mathbf{N}_0 取平面的法线矢量,点 Q 取平面镜的形心(图 3)。一般情况下,镜面单元初次安装后会存在位姿误差。球铰中心 $A\sim C$ 分别位于 $A_t\sim C_t$ 位置,镜面单元的轴线矢量为 \mathbf{N}_t ,顶点位于点 Q_t ,其位置矢量为 \mathbf{Q}_t 。

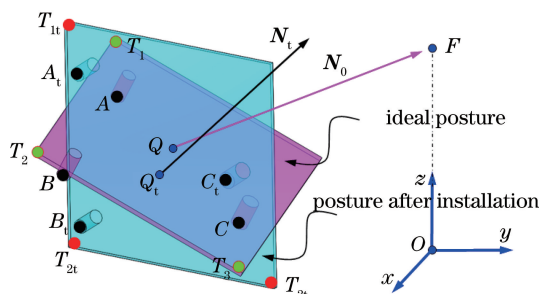


图 3 镜面单元的理想位姿和误差位姿

Fig. 3 Ideal posture and error posture of the mirror unit

镜面单元一般采用精密模具成型制造,镜面单元的几何精度较高,其由反射镜面几何形状与球铰中心的位置关系确定(由设计图纸获知)。为了快速地测量镜面单元的空间位姿,本研究提出以 3 个特征点(构成三角形)的空间坐标反演镜面单元的空间位姿(图 3)。具体步骤如下:1)在镜面单元的反射镜表面粘贴 3 个圆形标志(摄影测量用的圆形标志),并以其中中心作为特征点,或直接使用镜面单元的边界角点作为特征点。理想情况下,3 个特征点 $T_1\sim T_3$ 的坐标已知,其位置矢量分别为 \mathbf{T}_i (即 $\mathbf{T}_i = \overrightarrow{OT_i}$)、 \mathbf{T}_2 、 \mathbf{T}_3 ;2)镜面单元初次安装后,特征点 $T_1\sim T_3$ 分别位于 T_{1t} 、 T_{2t} 和 T_{3t} 位置。采用摄影测量方法^[24]确定 3 个特征点的位置矢量分别为 \mathbf{T}_{1t} 、 \mathbf{T}_{2t} 和 \mathbf{T}_{3t} ,满足(1)式;3)通过特征点的位置矢量反演镜面单元的位姿参数,其中,摄影测量的全局坐标系采用十字形标志靶或棋盘格标靶进行标定(第 3.2 节的实验采用此方法),在标靶上建立设计坐标系 $O\text{-}xyz$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{1t} = \mathbf{T}_1 + \mathbf{t}_1 \\ \mathbf{T}_{2t} = \mathbf{T}_2 + \mathbf{t}_2, \\ \mathbf{T}_{3t} = \mathbf{T}_3 + \mathbf{t}_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{t}_1\sim\mathbf{t}_3$ 分别为特征点 $T_1\sim T_3$ 的位置误差矢量。

提出“一移两转”(1 次平移运动和两次旋转运动)刚体运动方法计算镜面单元位姿的变换过程,即镜面单元从理想位姿经过“一移两转”刚体运动到达初次的安装位姿。具体运动包括:1)整体平移运动:使点 T_1 (理想位置)平移到点 T_{1t} 位置。此时,点 T_2 和 T_3 分别平移到 T_{2t}^1 和 T_{3t}^1 位置;2)镜面单元绕点 T_{1t} 旋转(旋转轴矢量为 \mathbf{n}_1 ,旋转的角度为 φ_1),使点 T_{3t}^1 运动到点 T_{3t} 位置。此时,点 T_{2t}^1 运动到 T_{2t}^2 位置;3)镜面单元绕 $T_{1t}T_{3t}$ 轴线(旋转轴矢量为 \mathbf{n}_2)旋转角度 φ_2 ,使点 T_{2t}^2 运动到点 T_{2t} 位置,至此镜面单元已到达初次的安装位姿。通过上述 3 次刚体运动过程,可以推导出镜面单元刚体运动的总旋转矩阵和平移矩阵,进而确定镜面单元的轴线矢量 \mathbf{N}_t 和顶点位置矢量 \mathbf{Q}_t 。具体公式推导过程详见文献[3]。根据“一移两转”刚体运动方法,镜面单元的轴线矢量 \mathbf{N}_t 和顶点位置矢量 \mathbf{Q}_t 分别为

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_t = (\mathbf{Q} - \mathbf{T}_1) \cdot R(\mathbf{n}_1, \varphi_3) \cdot R(\mathbf{n}_2, \varphi_2) + \mathbf{T}_1 + \mathbf{t}_1 \\ \mathbf{N}_t = \mathbf{N}_0 \cdot R(\mathbf{n}_1, \varphi_3) \cdot R(\mathbf{n}_2, \varphi_2) \end{cases}, \quad (2)$$

式中函数 $R(\mathbf{e}, \beta)$ 的功能是实现向量 $\mathbf{P} \in \mathbf{R}^{1 \times 3}$ 绕任意单位向量 $\mathbf{e} = [e_x, e_y, e_z]$ 旋转 β 角度^[3]。

此时,球铰中心的位置矢量 $\mathbf{A}_t \sim \mathbf{C}_t$ 分别为

$$\begin{cases} \mathbf{A}_t = (\mathbf{A} - \mathbf{T}_1) \cdot R(\mathbf{n}_1, \varphi_3) \cdot R(\mathbf{n}_2, \varphi_2) + \mathbf{T}_1 + \mathbf{t}_1 \\ \mathbf{B}_t = (\mathbf{B} - \mathbf{T}_1) \cdot R(\mathbf{n}_1, \varphi_3) \cdot R(\mathbf{n}_2, \varphi_2) + \mathbf{T}_1 + \mathbf{t}_1 \\ \mathbf{C}_t = (\mathbf{C} - \mathbf{T}_1) \cdot R(\mathbf{n}_1, \varphi_3) \cdot R(\mathbf{n}_2, \varphi_2) + \mathbf{T}_1 + \mathbf{t}_1 \end{cases} \quad (3)$$

至此,已建立了镜面单元的空间位姿与特征点坐标相关联的数学模型,可实现镜面单元位姿的快速测量。而(2)式与(3)式可以将镜面单元的空间位姿与球铰中心坐标进行关联,为后续镜面单元的定量调焦奠定了基础。

3.2 校准轴线矢量的定量调节方法

刚体运动过程具有可逆性,即由位姿1运动到位姿2后,可以按相反的路径或顺序从位姿2返回到位姿1。结合镜面单元的调焦动作(各球头螺栓的伸缩运动,本质上是镜面单元的绕轴转动),提出“三转一移”[3次旋转运动(旋转顺序是ABC,即依次旋转球铰中心A、B和C)和1次平移运动]刚体运动来等效(2)式的位姿参数,而按相反的运动顺序来校准镜面单元的位姿误差。镜面位姿误差包括轴线矢量误差和顶点位置误差,轴线矢量误差对聚光器光学性能的影响远大于顶点位置误差^[5],本研究仅研究镜面单元的轴线矢量误差的校准。这还包括两个原因:其一是镜面单元初次安装的定位误差能控制在25 mm以内,则顶点位置误差对聚光器光学性能影响很小;其二是为了消除顶点位置误差可能会恶化轴线矢量误差,因为图1和图2的支撑-调节结构较难实现只平动而不转动的调节过程。

镜面单元的“三转一移”刚体运动过程包括:1)镜面单元位于理想位姿,将镜面单元绕轴线CB(旋转轴矢量为 \mathbf{e}_{CB})旋转角度 θ_A ,此时点A运动到 \mathbf{A}_t^1 位置;2)镜面单元绕轴线 $\mathbf{A}_t^1\mathbf{C}$ (旋转轴矢量为 $\mathbf{e}_{A_t^1\mathbf{C}}$)旋转角度 θ_B ,此时点B运动到 \mathbf{B}_t^1 位置;3)镜面单元绕轴线 $\mathbf{B}_t^1\mathbf{A}_t^1$ (旋转轴矢量为 $\mathbf{e}_{B_t^1A_t^1}$)旋转角度 θ_C ,此时点C运动到 \mathbf{C}_t^1 位置;4)镜面单元按向量 $\mathbf{M}_1 = [x, y, z]$ 进行平移运动。上述“三转一移”刚体运动过程的公式推导详见文献[5]。镜面单元经过“三转一移”刚体运动后,轴线矢量 \mathbf{N}_t^1 和顶点位置矢量 \mathbf{Q}_t^1 分别为

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_t^1 = (\mathbf{Q} - \mathbf{C}) \cdot \mathbf{H}^{ABC} + \mathbf{C}_t^1 + \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{N}_t^1 = \mathbf{N}_0 \cdot \mathbf{H}^{ABC} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{H}^{ABC} 为ABC旋转顺序的总旋转矩阵, $\mathbf{H}^{ABC} = R(\mathbf{e}_{CB}, \theta_A) \cdot R(\mathbf{e}_{A_t^1\mathbf{C}}, \theta_B) \cdot R(\mathbf{e}_{B_t^1A_t^1}, \theta_C)$, $\mathbf{e}_{CB} = \frac{\mathbf{B} - \mathbf{C}}{\|\mathbf{B} - \mathbf{C}\|}$,

$$\mathbf{e}_{A_t^1\mathbf{C}} = \frac{\mathbf{C} - \mathbf{A}_t^1}{\|\mathbf{C} - \mathbf{A}_t^1\|}, \mathbf{e}_{B_t^1A_t^1} = \frac{\mathbf{A}_t^1 - \mathbf{B}_t^1}{\|\mathbf{A}_t^1 - \mathbf{B}_t^1\|}, \mathbf{A}_t^1 = (\mathbf{A} - \mathbf{C}) \cdot R(\mathbf{e}_{CB}, \varphi_A) + \mathbf{C}, \mathbf{B}_t^1 = (\mathbf{B} - \mathbf{C}) \cdot R(\mathbf{e}_{A_t^1\mathbf{C}}, \varphi_B) + \mathbf{C}, \mathbf{C}_t^1 = (\mathbf{C} - \mathbf{B}_t^1) \cdot R(\mathbf{e}_{B_t^1A_t^1}, \theta_C) + \mathbf{B}_t^1.$$

要想使“三转一移”刚体运动后的位姿[(4)式]与镜面单元的初次安装位姿[(2)式]等价,关键是找到一组 $\theta_A \sim \theta_C$ 使矢量 \mathbf{N}_t^1 与 \mathbf{N}_t 平行,而后再求解矢量 \mathbf{M}_1 使 $\mathbf{O}_t^1 = \mathbf{O}_t$ 。矢量 \mathbf{N}_t^1 与 \mathbf{N}_t 平行就是两者夹角的最小化问题,优化目标为

$$\min [f(\theta_A, \theta_B, \theta_C)] = \arccos \left(\left| \frac{\mathbf{N}_t^1 \cdot \mathbf{N}_t}{\|\mathbf{N}_t^1\| \cdot \|\mathbf{N}_t\|} \right| \right). \quad (5)$$

如图4所示,镜面单元依次旋转CBA球铰中心来校准其轴线矢量误差(称为三转调焦方法),即依次调节支撑3、支撑2和支撑1的球头螺栓。具体调焦时的刚体运动过程是:1)镜面单元位于初次安装的误差位姿,将镜面单元绕轴线矢量 $\mathbf{e}_{A_t B_t}$ 旋转角度 θ_C ,此时点 \mathbf{C}_t 运动到 \mathbf{C}_{al} 位置;2)镜面单元绕轴线矢量 $\mathbf{e}_{C_{al}A_t}$ 旋转角度 θ_B ,此时点 \mathbf{B}_t 运动到 \mathbf{B}_{al} 位置;3)镜面单元绕轴线矢量 $\mathbf{e}_{B_{al}C_{al}}$ 旋转角度 θ_A ,此时点 \mathbf{A}_t 运动到 \mathbf{A}_{al} 位置,镜面单元的轴线矢量由 \mathbf{N}_t 变为 \mathbf{N}_{al} ,顶点位置矢量由 \mathbf{Q}_t 变为 \mathbf{Q}_{al} 。镜面单元经过三转调焦后的残留误差采用误差夹角 θ 和误差距离 L 进行表征。误差夹角 θ 是镜面单元的轴线矢量 \mathbf{N}_{al} 与理想矢量 \mathbf{N}_0 的夹角,误差距离 L 是顶点 \mathbf{Q}_{al} 与理想顶点 \mathbf{Q} 的直线距离,可以表示为

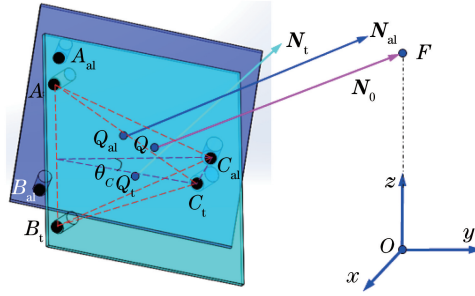


图 4 镜面单元经过 3 次旋转运动消除轴线矢量的误差

Fig. 4 Eliminate the axis vector error after three rotational motions of the mirror unit

$$\begin{cases} L = \|\overrightarrow{QQ_{al}}\| = \|\mathbf{Q}_t \cdot \mathbf{H}_{al}^{BCA} - \mathbf{A}_t \cdot \mathbf{H}_{al}^{BCA} + \mathbf{A}_{al}\| \\ \theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{N}_{al} \cdot \mathbf{N}_0}{\|\mathbf{N}_{al}\|}\right) \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $\mathbf{H}_{al}^{BCA} = R(\mathbf{e}_{A_t B_t}, \theta_C) \cdot R(\mathbf{e}_{C_{al} A_t}, \theta_B) \cdot R(\mathbf{e}_{B_{al} C_{al}}, \theta_A)$, $\mathbf{A}_{al} = (\mathbf{A}_t - \mathbf{B}_{al}) \cdot R(\mathbf{e}_{B_{al} C_{al}}, \theta_A) + \mathbf{B}_{al}$, $\mathbf{C}_{al} = (\mathbf{C}_t - \mathbf{A}_t) \cdot R(\mathbf{e}_{A_t B_t}, \theta_C) + \mathbf{A}_t$, $\mathbf{B}_{al} = (\mathbf{B}_t - \mathbf{A}_t) \cdot R(\mathbf{e}_{C_{al} A_t}, \theta_B) + \mathbf{A}_t$, $\mathbf{N}_{al} = \mathbf{N}_0 \cdot \mathbf{H}_{al}^{CBA}$ 。采用遗传算法来求解非线性的(5)式。本研究采用 Matlab R2012a 软件 Genetic Algorithm Tool 的 Ga()函数来优化(5)式,得到旋转角 $\theta_A \sim \theta_C$ 。考虑到遗传算法优化结果的随机性,对(5)式进行 m 次遗传优化求解(本研究取 $m = 45$),得到 m 组角度 $\theta_A \sim \theta_C$,并选出使误差角[(6)式]最小的一组旋转角 $\theta_A \sim \theta_C$,作为镜面调焦的参数。

镜面单元调焦的 3 次绕轴旋转运动是靠调节各球头螺杆的伸缩实现的,需将转角 $\theta_A \sim \theta_C$ 转换为相应球头螺栓的调节量。以图 5 为例,调节支撑 3 的球头螺栓时(螺杆 1 和螺杆 2 均固定),使球铰中心 C_t 运动到 C_{al} 位置,这构成一个三角几何。一般来说,夹角 ω 值较小,满足 $\cos \omega \approx 1.0$,所以三角形的几何参数满足 $|L_C^{al} - L_C^t| \approx d_C^t$,而支撑 3 的球头螺栓调节量 d_C 就是 L_C^t 与 L_C^{al} 的差值,即 $|d_C| = |L_C^{al} - L_C^t| = d_C^t$ 。同理,镜面单元各球头螺栓的调节量为

$$\begin{cases} d_C = \frac{\theta_C}{|\theta_C|} \|\mathbf{C}_t - \mathbf{C}_{al}\| = n_C \cdot S \\ d_B = \frac{\theta_B}{|\theta_B|} \|\mathbf{B}_t - \mathbf{B}_{al}\| = n_B \cdot S, \\ d_A = \frac{\theta_A}{|\theta_A|} \|\mathbf{A}_t - \mathbf{A}_{al}\| = n_A \cdot S \end{cases}, \quad (7)$$

式中 S 为球头螺杆下段螺纹的螺距; $n_C \sim n_A$ 分别为球铰螺杆 3~球铰螺杆 1 调节的转动圈数。 $\theta_C/|\theta_C|$ 、 $\theta_B/|\theta_B|$ 和 $\theta_A/|\theta_A|$ 用于确定球头螺杆的伸缩方向。当球铰中心 $A \sim C$ 的连接顺序为顺时针(图 6), $\theta_A/|\theta_A| \sim \theta_C/|\theta_C|$ 的值为 1 时,球头螺杆向下调整(即 $L_C^{al} < L_C^t$);反之值为 -1 时,球头螺杆向上调整。当球铰中心 $A \sim C$ 的连接顺序为逆时针(图 7), $\theta_A/|\theta_A| \sim \theta_C/|\theta_C|$ 的值为 1 时,球头螺杆向上调整;反之值为 -1 时,球头螺杆向下调整。

此外,每个支撑-调节结构的调节范围有限制,结构设计时需确保其拥有足够的调整量。调节限制主要来自于套筒螺杆与安装座通孔侧壁面的碰撞(图 5)、球头螺杆与镜面单元背部连接孔壁的碰撞(即圆杆在圆

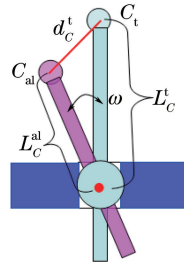


图 5 镜面单元螺杆的调节示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mirror unit screw adjustment

柱孔中的摆动极限问题),以及套筒螺杆和球头螺杆的螺纹副连接长度。前两个摆动极限问题可以通过增大孔径与轴径的差值来解决,这很容易实现。

4 支撑-调节结构与位姿校准方法的验证

4.1 虚拟调焦实验

镜面单元的轴线矢量误差校准是刚体运动问题,采用 SolidWorks 2012 平台的装配功能,可以实施精确的虚拟调焦实验。由于不存在任何的结构误差、测量误差和调节误差,因此能从理论上验证三转调焦方法的正确性。如图 6 所示,在 SolidWorks 2012 的装配环境建立虚拟调焦实验平台。镜面单元零件上固结了轴线矢量指示杆,用于准确测量镜面单元的轴线矢量和顶点位置矢量[图 6(a)],在调节螺杆的侧面设置了刻度尺,方便查看调节的移动量[图 6(b)]。分别建立 3 点支撑(记为 part1)和 4 点支撑(记为 part2)两种镜面单元的虚拟调焦实验模型,选取的是 38 kW 聚光器[图 1(a)]最外环的镜面单元^[3]。理想情况下,part1 的球铰中心 $A \sim C$ 的位置矢量分别为 $\mathbf{A} = [8454.16, 1881.66, 1863.21]$, $\mathbf{B} = [8633.81, 104.03, 1839.79]$, $\mathbf{C} = [7638.40, 906.52, 1456.55]$,单位为 mm(下同)。part2 的球铰中心 A 和 B 的位置与 part1 相同,仅更改球铰中心 C 的位置,其位置矢量 $\mathbf{C} = [7695.98, 104.03, 1435.85]$ 。part1 和 part2 的轴线矢量 $\mathbf{N}_0 = [0, 0, 1.0]$,顶点位置矢量 $\mathbf{Q} = [0, 0, 0]$,焦点 $\mathbf{F} = [0, 0, 9490.00]$ 。

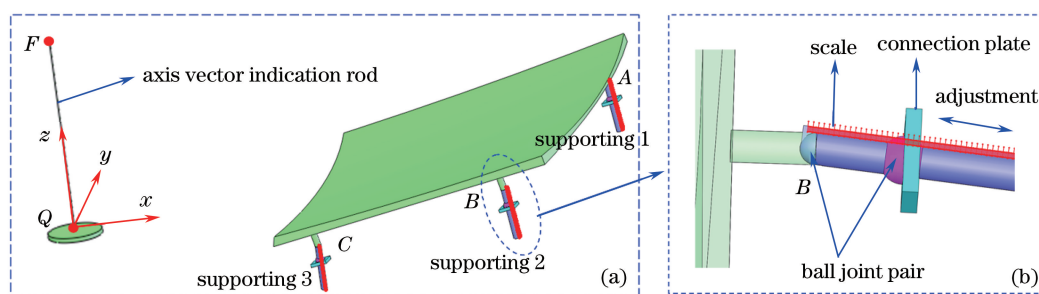


图 6 利用 SolidWorks 软件建立的镜面单元的虚拟调焦实验平台

Fig. 6 Virtual alignment experiment platform of mirror unit by using SolidWorks software

镜面单元位姿误差是通过依次调节支撑 1、支撑 2 和支撑 3 的螺栓引入的。镜面单元 part1 的位姿误差引入过程为:镜面单元位于理想位姿,支撑 1 向上[即图 6(b)中向左边移动]顶 10 mm(固定支撑 2 和支撑 3);支撑 2 向下移动 8 mm(固定支撑 1 和支撑 3);支撑 3 向下移动 5 mm(固定支撑 1 和支撑 2);镜面单元整体按矢量 $\mathbf{M} = [12.0, 10.5]$ 平移。同理,镜面单元 part2 的位姿误差引入过程为:支撑 1 向上顶 5 mm;支撑 2 向上移动 12 mm;支撑 3 向下移动 10 mm;镜面单元整体按矢量 $\mathbf{M} = [12.0, 10.5]$ 平移。经过上述刚体运动后,再次测量各球铰中心的位置矢量 $\mathbf{A}_1 \sim \mathbf{C}_1$,如表 1 所示。虚拟调焦中以球铰中心 $A \sim C$ 分别替代特征点 $T_1 \sim T_3$,根据(1)~(7)式计算各球头螺杆的调节量,而后根据调节量依次对支撑 3、支撑 2 和支撑 1 调节。镜面单元的理论计算结果和虚拟调焦后的测量结果如表 1 所示。

前期对 38 kW 碟式聚光器的研究表明^[3],聚光器跟踪误差(相当于轴线矢量误差)在 0.1° 以内时,吸热器能流分布比较合理。由于聚光器各镜面单元轴线矢量的误差分布具有随机性,可有利于吸热器腔体能流分布的均匀化。因此,对 38 kW 碟式聚光器(直径为 17.70 m)而言,镜面单元的轴线矢量误差夹角在 0.1° (1.75 mrad) 以内是可接受的。文献[20]测得 8.5 m 直径碟式聚光器的总平均误差是 2.66 mrad 。如表 1 所示,在理论计算方面,part1 轴线矢量的误差夹角由 0.6502° 校准到 0.00053° ,part2 轴线矢量的误差夹角由 1.2942° 校准到 0.00071° ,可以说轴线矢量误差已基本被消除。在虚拟调焦实验方面,part1 和 part2 调节后轴线矢量的误差夹角分别为 0.0455° (即 0.79 mrad)和 0.0503° ,理论上完全满足太阳能聚光器镜面的安装要求,验证了三转调焦方法用于校正镜面单元轴线矢量误差的有效性。对于理论计算结果与虚拟调焦结果存在的差异,主要是由数值计算的舍入误差和图 5 中小夹角的简化引起。此外,镜面单元三转调焦后的顶点位置仍存在一定误差,此误差主要是由镜面单元的平移运动造成($\|\mathbf{M}\| = 16.40 \text{ mm}$)。三转调焦方法不能完全消除此平移误差,需要在镜面单元初次安装时对此进行控制。

表 1 镜面单元的理论计算和虚拟调焦结果
Table 1 Theoretical calculation and virtual focusing results of the mirror unit

Mirror unit supporting form	Posture error (measured values of virtual platform)	Theoretical calculation (three rotational motion alignment method)	Virtual alignment
Part1: three points supporting	$\mathbf{A}_i = [8462.17, 1891.11, 1877.40]$	$L = 21.68 \text{ mm}$	$L = 26.08 \text{ mm}$
	$\mathbf{B}_i = [8649.01, 114.53, 1837.42]$	$\theta = 0.00053^\circ$	$\theta = 0.0455^\circ$
	$\mathbf{C}_i = [7652.56, 916.86, 1456.58]$	$d_A = 23.38 \text{ mm}$	$\mathbf{F}_{al} = [11.31, 10.72, 9475.89]$
	$\mathbf{F}_i = [-26.61, -99.08, 9427.90]$	$d_B = 5.31 \text{ mm}$	$\mathbf{Q}_{al} = [18.83, 11.28, -14.10]$
	$\mathbf{Q}_i = [26.01, -5.07, -51.49]$	$d_C = 7.92 \text{ mm}$	
	$L = 57.88 \text{ mm}$ $\theta = 0.6502^\circ$		
Part2: four points supporting	$\mathbf{A}_i = [8464.18, 1891.89, 1872.81]$	$L = 16.59 \text{ mm}$	$L = 17.92 \text{ mm}$
	$\mathbf{B}_i = [8640.98, 113.40, 1855.88]$	$\theta = 0.00071^\circ$	$\theta = 0.0503^\circ$
	$\mathbf{C}_i = [7712.48, 114.57, 1430.86]$	$d_A = 7.99 \text{ mm}$	$\mathbf{F}_{al} = [20.01, 9.55, 9499.66]$
	$\mathbf{F}_i = [-163.09, 35.82, 9309.79]$	$d_B = 15.17 \text{ mm}$	$\mathbf{Q}_{al} = [11.68, 9.56, 9.66]$
	$\mathbf{Q}_i = [50.61, 22.74, -177.80]$	$d_C = -7.89 \text{ mm}$	
	$L = 186.33 \text{ mm}$ $\theta = 1.2942^\circ$		

镜面单元 part1 和 part2 位姿校准的调节参数与位姿误差的引入参数完全不同,但仍能实现镜面位姿误差的校准,这说明镜面单元运动到某位姿状态,可以通过不同的运动路径来实现,也就是说镜面单元的调焦过程具有多样性。

4.2 平面单元的调节实验

4.2.1 实验平台及实验过程

如图 7 所示,本实验搭建的定量调节实验平台主要包括待调的金属平板、电荷耦合器件(CCD)相机、陶瓷棋盘靶(用于标定相机的内外参数)和圆形标志等。金属平板的上表面通过数控铣削加工而成,是实验中要校准的虚拟“镜面”。实验方案为:采用三转调焦方法对金属平板实施调节,达到虚拟“镜面”与棋盘靶表面平行,从而验证三转调焦方法的工程应用价值。金属平板背部的 3 个球铰中心 $A \sim C$ [图 2(a)的支撑-调节结构]在设计坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ (原点 O_1 在平板的中心)的位置已知,位置矢量分别为 $\mathbf{A}_{O_1-x_1y_1z_1} = [142.5, 152.5, -24.0]$, $\mathbf{B}_{O_1-x_1y_1z_1} = [-142.5, 152.5, -24.0]$, $\mathbf{C}_{O_1-x_1y_1z_1} = [-142.5, -152.5, -24.0]$ 。在金属平板的上方粘贴 3 个直径为 16 mm 的圆形标志(粘在螺母顶部,位于球铰中心的正上方),各圆形标志的中心分别作为特征点 $T_1 \sim T_3$,在 $O_1-x_1y_1z_1$ 坐标系中的位置矢量分别为 $\mathbf{T}_{1(O_1-x_1y_1z_1)} = [142.5, 152.5, 6.0]$, $\mathbf{T}_{2(O_1-x_1y_1z_1)} = [-142.5, 152.5, -24]$, $\mathbf{T}_{3(O_1-x_1y_1z_1)} = [-142.5, -152.5, 6.0]$ 。此外,在金属平板的虚拟“镜面”上粘贴 13 个直径为 10 mm 的圆形标志,用于摄影测量后拟合虚拟“镜面”的空间方程,以检验位姿测量和三转调焦方法的效果。

将陶瓷棋盘靶调至水平(采用电子倾角仪测量,分辨率是 0.1°),实验的全局坐标系 $O-xyz$ 建立在陶瓷棋盘靶表面(格子尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,精度 0.002 mm)。由于三转调焦方法仅校准镜面单元的轴线矢量误差,而镜面单元的平移误差并不影响其轴线矢量,所以用钢尺测量了点 O_1 在坐标系 $O-xyz$ 中的位置,得到金属平板的平移矢量 $\mathbf{M} = [560.0, 145.0, 24.0]$,从而确定理想位姿时特征点 $T_1 \sim T_3$ 和球铰中心 $A \sim C$ 在坐标系 $O-xyz$ 中的位置矢量如表 2 所示。实验过程为:将金属平板固定在任意位置;采用 CCD 相机[型号:Canon SX150 IS,分辨率:4320 pixel \times 3240 pixel,传感器尺寸:1/2.3 in(1 in=2.54 cm)]从不同的视角拍摄 16 张金属平板的照片(照片中包含棋盘靶);应用 Matlab 的 Camera Calibration Toolbox 工具箱对 CCD 相机进行内外参数的标定^[25];提取各圆形标志的中心点像素坐标,根据视觉测量理论^[24]计算各圆形标志中心点的世界坐标(坐标系 $O-xyz$);采用三转调焦方法计算各球头螺栓的调节量 $d_A \sim d_C$;根据调节量

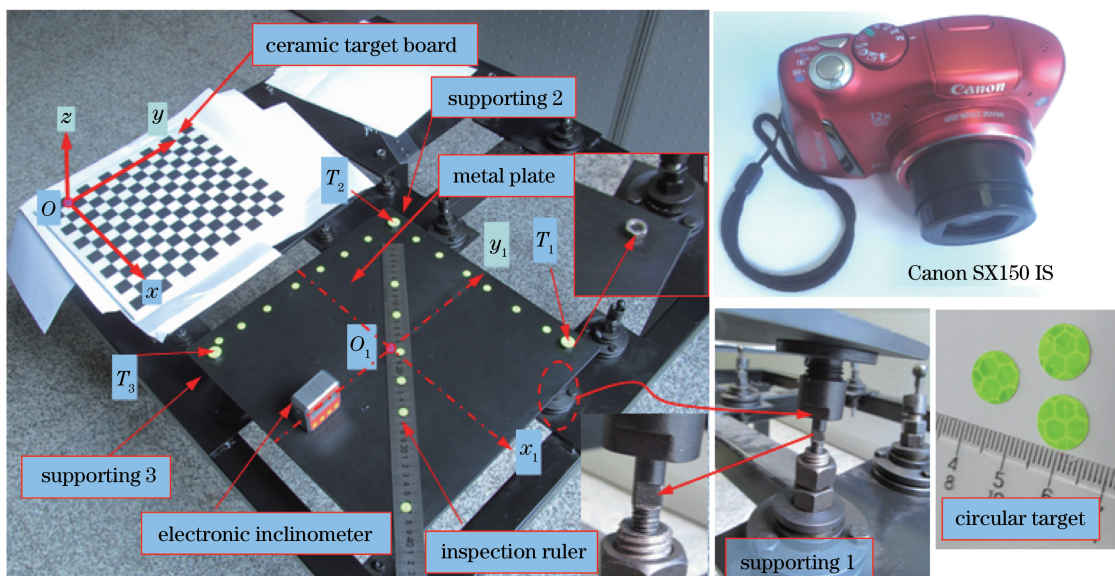


图 7 金属平板位姿校准的实验平台

Fig. 7 Experiment platform of the metal plate posture adjustment

$d_A \sim d_C$ 依次对支撑 3、支撑 2、支撑 1 实施调节；再次拍摄 16 张照片测量金属平板的空间位姿，用于检验三转调焦的效果。金属平板的轴线矢量校准过程仅包含 1 次摄影测量和 1 次定量调节，具有高效性。实验的计算结果如表 2 所示，摄影测量后最小二乘法拟合的调节前后金属平板平面方程如图 8 所示，调节前后的实物对比如图 9 所示。

表 2 金属平板位姿校准的实验数据

Table 2 Experimental data of metal plate posture alignment

Ideal condition	Posture error (visual measurement)	Quantitative alignment method (theoretical value)	After adjustment (visual measurement checkout)
$A = [702.5, 297.5, 0]$	$T_{1t} = [704.7, 290.6, 34.59]$	$d_A = 7.73 \text{ mm}$	$N_{11} = [0.0014, 0.0018, 1.0000]$
$B = [417.5, 297.5, 0]$	$T_{2t} = [421.2, 290.0, 33.98]$	$d_B = 8.75 \text{ mm}$	$\theta_1 = 0.1307^\circ$
$C = [417.5, -7.5, 0]$	$T_{3t} = [423.7, -14.71, 46.47]$	$d_C = -4.33 \text{ mm}$	
$T_1 = [702.5, 297.5, 30.0]$	$N_{11} = [0.0012, 0.0399, 1.0000]$	$\theta = 0.0052^\circ$	
$T_2 = [417.5, 297.5, 30.0]$	$\theta_1 = 2.2911^\circ$		
$T_3 = [417.5, -7.5, 30.0]$			
$N_0 = [0, 0, 1, 0]$			

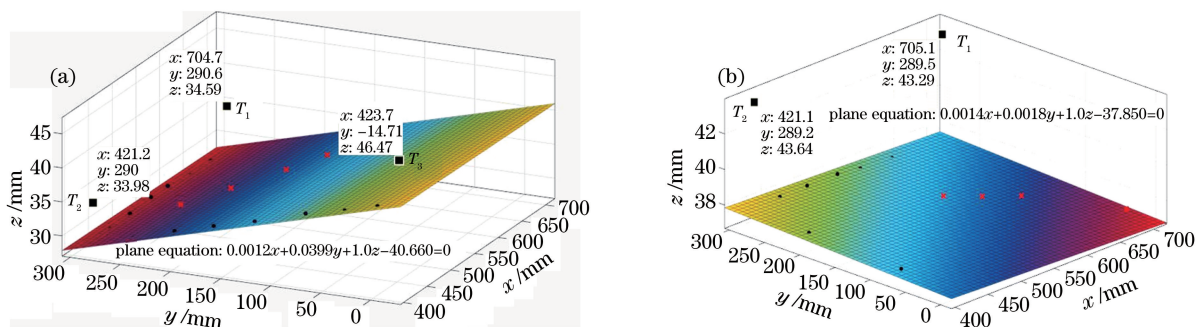


图 8 金属平板调节前后的平面方程。(a) 调节前的拟合平面；(b) 调节后的拟合平面

Fig. 8 Plane equation before and after the adjustment of the metal plate. (a) Fitting plane before adjustment; (b) fitting plane after adjustment

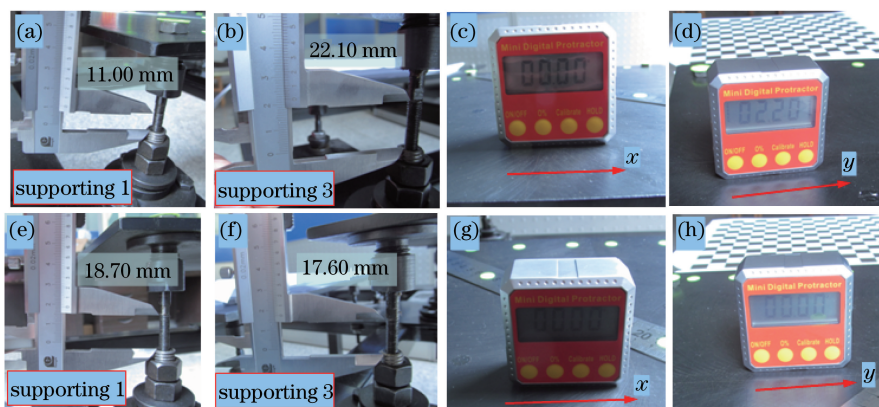


图9 (a) 调节前和(e)调节后支撑1球头螺杆的支撑长度对比; (b) 调节前和(f)调节后支撑3球头螺杆的支撑长度对比; (c) 调节前和(g)调节后金属平板沿 x 方向的倾角值对比; (d) 调节前和(h)调节后金属平板沿 y 方向的倾角值对比

Fig. 9 Screw 1 supporting length comparison (a) before and (e) after the adjustment; screw 3 supporting length comparison (b) before and (f) after the adjustment; metal plane incline angle value comparison along x direction (c) before and (g) after the adjustment; metal plane incline angle value comparison along y direction (d) before and (h) after the adjustment

4.2.2 结果分析

从定量调节结果(表2)来看,经过三转调焦后金属平板的轴线矢量误差角由调节前的 2.2911° 减小到 0.1307° (2.28 mrad),大幅度提升了金属平板的位姿精度,验证了三转调焦方法用于校准轴线矢量的有效性。金属平板调节前,采用电子倾角仪分别测量沿 x 轴和沿 y 轴的倾角,分别如图9(c)和(d)所示,得到总夹角为 2.20° 。摄影测量结果拟合平面的法线矢量[图8(a)]与 z 轴夹角为 2.2911° ,与电子倾角仪测量结果符合很好。采用“一移两转”刚体运动方法[(2)式]计算的误差夹角为 2.4636° ,与 2.2911° 的误差是 7.5% ,验证了三特征点的位姿测量方法的有效性。金属平板调节后,电子倾角仪的测量值为 0° [图9(g)、(h)],而摄影测量后拟合平面的法线矢量[图8(b)]与 z 轴的夹角为 0.1307° ,理论计算值是 0.0052° 。镜面单元的轴线矢量校准误差主要来自摄影测量误差、支撑-调节结构误差和螺杆调节量误差,其中摄影测量误差占主导。因此,提高特征点坐标的摄影测量精度是关键,是定量地准确校准镜面单元位姿的基础。

由于球头螺栓的调节量较小,调节时套筒螺杆基本没有偏斜。在调节支撑1时,尝试了将套筒螺杆处于固定状态,此时球头螺杆仍能顺畅地伸长 7.73 mm 。这说明球头螺杆调节量较小时,可直接调节球头螺杆而不需要拧松套筒螺杆两侧的螺母,从而可以大幅度提升镜面单元的位姿校准效率。在三转调焦方法的实施精度方面,实验校准后达到 2.28 mrad ,已经优于文献[20]聚光器面形的平均误差 2.66 mrad ,初步验证了三转调焦方法可应用于聚光器镜面单元的最终校准。理论上说,本研究的位姿测量方法和三转调焦方法仅与特征点和球铰中心有关,对3个特征点只要满足三角形分布即可。但实际应用时会有摄影测量误差、特征点粘贴误差和支撑-调节结构误差等的存在,为提高位姿测量和校准的精度,需要优化布置特征点、镜面支撑位置和相机视场,这是下一步的研究重点。

此外,在实际应用中,可采用两种高效的方式实施聚光器镜面单元位姿校准。其一,采用双目视觉测量方法,实时地测量正在安装的镜面单元的空间位姿(可以人工控制顶点位置误差),采用三转调焦方法及时实施轴线矢量的校准,完成此镜面单元的最终安装。其二,一次性地将全部镜面单元粗安装完毕,采用单目多视角摄影测量方法(本实验方法)确定各镜面单元的空间位姿,采用三转调焦方法计算各镜面单元球头螺杆的调节量,而后对全部镜面单元实施位姿校准。

5 结 论

聚光器镜面单元的位姿校准是解决太阳能聚光集热利用的共性问题,其关键是支撑-调节结构的设计和定量的位姿校准方法。本研究提出了镜面单元位姿(轴线矢量和顶点位置)的快速测量方法和定量校准方法(即三转调焦方法),以及一种螺纹副与球铰副组合的镜面单元新支撑-调节结构。利用摄影测量方法确定反

射镜表面的3个圆形标志的中心坐标,就可快速反演出镜面位姿和球铰中心坐标,避免了粘贴大量标志对镜面造成的光学“污染”。三转调焦方法可计算出镜面单元各支撑结构的调节量,能实现镜面单元轴线矢量误差的快速校准。在SolidWorks虚拟调焦实验中,镜面单元的轴线矢量误差角分别由 0.6502° 和 1.2942° 校准到 $0.0455^\circ(0.79\text{ mrad})$ 和 0.0503° ,验证了三转调焦方法的正确性。在金属平板调节实验中,金属平板的轴线矢量误差角由 2.2911° 校准到 $0.1307^\circ(2.28\text{ mrad})$,初步验证了三转调焦方法和新支撑-调节结构可应用于聚光器镜面的最终安装。理论而言,本研究提出的位姿测量方法和三转调焦方法均不受镜面支撑位置和镜面几何限制,只需关注特征点坐标、球铰中心坐标和轴线矢量的变化,因此可用于不同形式聚光器镜面的位姿校准。

参 考 文 献

- [1] Baharoom 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] Behar O, Abdallah K, Mohammedi K. A review of studies on central receiver solar thermal power plants [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 23(4): 12-39.
- [3] 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.
- [4] Yan Jian, Peng Youduo, Xiao Rong, *et al.* Focus analysis of dish condenser based on structure characteristic and mirror unit installation error[J]. *Optical Technique*, 2014, 40(6): 508-514.
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.
- [5] Yan Jian, Peng Youduo, Cheng Ziran, *et al.* Correlative characteristics between focal spot of solar dish concentrator mirror unit and posture error[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1122003.
颜 健, 彭佑多, 程自然, 等. 碟式聚光器镜面单元聚焦光斑与位姿误差的关联特性研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1122003.
- [6] Lan Wei, Liu Xiaoguang. Focusing methods of solar-electric dish Stirling system[J]. *Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Generation*, 2015(2): 17-20.
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(2): 17-20.
- [7] Coventry J, Pye J. Heliostat cost reduction-where to now?[J]. *Energy Procedia*, 2014, 49(5077): 60-70.
- [8] Ren L X, We 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.
- [9] Jones S A, Neal D R, Gruetzner J K, *et al.* VSHOT: a tool for characterizing large, imprecise reflectors [R]. Albuquerque: Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1996.
- [10] Wendelin T, May K, Gee R. Video scanning Hartmann optical testing of state-of-the-art parabolic trough concentrators [C]. Colorado: ASME 2006 International Solar Energy Conference, 2006: 699-707.
- [11] Mlatho J S P, McPherson M, Mawire A, *et al.* Determination of the spatial extent of the focal point of a parabolic dish reflector using a red laser diode[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(9): 1982-1990.
- [12] Li Yan, Li Hao, Gao Feng, *et al.* Detection method of surface error based on laser imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 091202.
李 艳, 李 浩, 高 峰, 等. 基于激光成像的面形误差检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 091202.
- [13] Burgess G, Shortis M, Kearton A, *et al.* Photogrammetry for dish concentrator construction [C]. Queensland: Solar09, 47th ANZSES Conference, 2009: 1-10.
- [14] Xiao G, Yang T, Ni D, *et al.* A model-based approach for optical performance assessment and optimization of a solar dish[J]. *Renewable Energy*, 2016, 100: 103-113.
- [15] 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(4): 815-821.
- [16] Balghouthi M, Ali A B H, Trabelsi S E, *et al.* Optical and thermal evaluations of a medium temperature parabolic

- trough solar collector used in a cooling installation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 86(5): 1134-1146.
- [17] Skouri S, Ali A B H, Bouadila S, *et al.* Optical qualification of a solar parabolic concentrator using photogrammetry technique[J]. *Energy*, 2015, 90(1): 403-416.
- [18] Steffen B J, Andraka C E, Diver R B. Development and characterization of a color 2F alignment method for the advanced dish development system[C]. Hawaii: ASME 2003 International Solar Energy Conference, 2003: 657-663.
- [19] Andraka C E, Diver R B, Rawlinson K S. Improved alignment technique for dish concentrators[C]. Hawaii: ASME 2003 International Solar Energy Conference, 2003: 625-635.
- [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] Diver R B, Moss T A. Test results and status of the TOP alignment system for parabolic trough solar collectors[C]. Arizona: ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability, 2010: 511-517.
- [22] Prah C, Stanicki B, Hilgert C, *et al.* Airborne shape measurement of parabolic trough collector fields[J]. *Solar Energy*, 2013, 91: 68-78.
- [23] 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.
- [24] Ma Songde, Zhang Zhengyou. Computer vision[M]. Beijing: Science Press, 1998: 52-94.
马颂德, 张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 52-94.
- [25] Bouguet J Y. Camera calibration toolbox for Matlab [EB/OL]. (2015-10-14). http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.