

引用格式：杨欣, 李伟超, 王霄, 等. 1.05 m 激光望远镜基墩改造与圆顶偏心改正[J]. 时间频率学报, 2021, 44(3): 222-230.

1.05 m 激光望远镜基墩改造与圆顶偏心改正

杨欣^{1,2,3}, 李伟超^{1,2}, 王霄^{1,2}, 杨旭海^{1,2}, 安元元^{1,2,3}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600 ;
2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600 ;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中国科学院国家授时中心将骊山天文观测站 1.05 m 赤道式光学望远镜升级改造为光学观测和激光观测多功能的地平式望远镜, 对原基墩进行相应的改造, 但望远镜的旋转中心和圆顶的球心仍不能重合, 圆顶天窗位置应相对于圆顶的球心, 偏心装置望远镜指向与球心为准圆顶天窗位置有所不同。基于观测任务对望远镜圆顶和基墩进行改造(向北 1.205 m, 向上 0.5 m), 根据改造后的设计对目标运动进行了讨论, 并给出了定量的改正计算公式, 分析了基墩改造基本要求。通过计算结合当前基墩和圆顶的位置情况, 对偏心圆顶进行随动补偿分析, 找到满足望远镜在最高仰角观测时不影响观测的最佳位置。

关键词: 激光望远镜; 方位角; 偏心; 圆顶随动系统

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-03-0222-09

Reformation of 1.05 m laser telescope base pier and correction of eccentricity of dome

YANG Xin^{1,2,3}, LI Wei-chao^{1,2}, WANG Xiao^{1,2}, YANG Xu-hai^{1,2}, AN Yuan-yuan^{1,2,3}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600;
2. Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The 1.05 meters of equatorial-mount optical telescope located at Mount Li, National Time Service Center, is upgraded for multi-functional altitude-azimuth mount telescope with capability for laser satellite ranging observations. Due to the change of mount type, the rotational center of the telescope and the center of the dome are not overlap, it is needed to move the pier to match the dome and telescope centers. A geometric analysis is carried out to find the best pier offset (1.205 m northward, 0.5 m upward) to satisfy the maximum elevation Angle (87°) of the telescope. Meanwhile, the optimal altitude-azimuth angles relationship between the dormer and the telescopes is derived, which can be used in the servo follow-up system of the dormer.

Key words: laser telescope; azimuth; eccentric; follow-up system of dome

0 引言

卫星激光测距技术 (satellite laser ranging, SLR) 是 20 世纪 60 年代中期出现的精密空间测量技术, 其原理是通过精确测定激光脉冲从地面观测站到装有后向反射镜的卫星之间的往返时间间隔, 从而获得地面观测站至卫星的距离, 为精密测定卫星轨道、地球自转参数确定以及全球范围的地面参考系的建立等提供数据资料。高精度的卫星激光测距技术与其他空间观测技术对比具有明显的优势: 激光的波束窄、方向性好, 不容易受到地面的干扰; 激光束具有单色性好的特点, 利用窄带滤光技术可以将激光回波从天空背景的噪声中区别出来, 可实现白天测距^[1]。

中国科学院国家授时中心 (原陕西天文台) 曾在 20 世纪 90 年代在骊山天文观测站建设了一架口径为 1.05 m 的反射式天文望远镜, 考虑到国家授时中心在科研和工程任务中的需求以及卫星激光测距技术的发展前景, 计划将此望远镜改造成为卫星导航、深空探测和飞行器精密定轨支撑平台, 使其在星地激光测距、北斗和 GNSS 以及卫星精密定轨、空间定位等领域发挥作用。

原望远镜跟踪机架为赤道式结构, 望远镜的赤经转动轴与地球自转轴平行, 赤纬转动轴与赤经轴垂直。这种赤道式结构的望远镜在观测天体运动时, 绕赤经轴匀速转动的望远镜可以抵消因地球自转引起的天体的周日视运动, 使观测目标始终保持在望远镜视场中。为了使整个望远镜的转动中心处于圆顶中心, 望远镜底座处于圆顶偏心位置。地平式跟踪机架具有明显的力学优势, 适用于大口径的望远镜使用, 由于这种结构在观测过程中回转半径较小, 望远镜的圆顶尺寸较小, 虽然地平式望远镜的控制系统设计较之赤道式望远镜更为复杂, 但随着计算机技术的发展, 控制系统的设计已不是问题, 综合考虑重量、体积和成本等因素, 在进行升级改造时计划将此望远镜设计为地平式跟踪结构的望远镜^[2]。

地平式望远镜的跟踪机架采用以观测者天顶方向为主轴 (垂直轴) 方向、以正北为方位零点的地平坐标系统, 在进行跟踪观测天体目标时, 望远镜绕垂直轴可以 360° 旋转指向不同方位角, 绕水平轴旋转可改变俯仰角, 以观测天体方位角和俯仰角进行跟踪观测^[3]。为提供给望远镜足够的转动空间, 一般将望远镜放置在整个圆顶的中心位置, 使得望远镜转动中心和圆顶转动中心重合, 在进行天体目标跟踪观测时, 要求圆顶天窗时刻对准望远镜, 并且能够随着望远镜的转动进行随动。由于赤道式望远镜和地平式望远镜的结构不同, 使得原放置赤道式望远镜的基墩并不适合放置改造后的地平式望远镜, 针对这一问题, 本文分析了地平式望远镜的观测方式和特点, 通过计算, 结合当前基墩位置情况以及望远镜圆顶基本情况, 找到望远镜放置的最佳位置, 满足望远镜在当前位置的最高仰角观测时不影响观测; 此外, 分析了圆顶转动角度与望远镜指向的关系, 为后续观测奠定了基础^[4-6]。

1 地平式望远镜观测原理及特点

以卫星相对于地面观测设备的方位角 A 和高度角 H 作为地平式激光望远镜跟踪观测的输入条件, 计算机控制系统控制伺服系统驱动望远镜跟踪机架瞄准目标卫星, 同步跟踪该卫星的运行。如图 1 所示的地平坐标系中, 观测站为原点 O , 向东为 x 轴正向, 向北为 y 轴正向, 向上为 z 轴正向。

图 1 中,

$$\tan A = \frac{x}{y}, \quad (1)$$

$$\tan H = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (2)$$

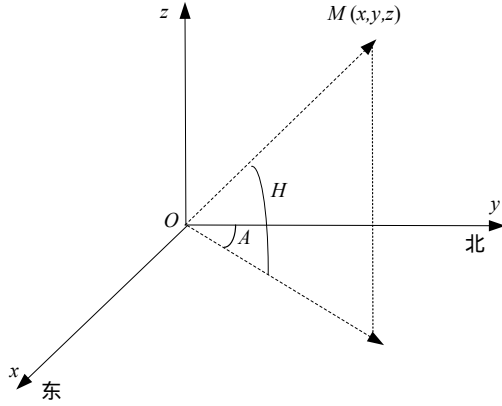


图 1 地平坐标系下的方位角与高度角

目标速度为 v ，距地面高度为 D ，方位角速度的最大值为 ω ，目标相对跟踪系统的最大仰角（即过顶时刻的仰角）为 E_m ：

$$E_m = \arctan \frac{\omega A_m D}{v} \quad (3)$$

根据地球万有引力等于向心力公式得到：

$$G \frac{Mm}{(R+D)^2} = m \frac{v^2}{R+D} \quad (4)$$

式(4)中， R 为地球半径 6 400 km， M 为地球质量 6.0×10^{24} kg， G 为引力常量 6.67×10^{-11} Nm^2/kg^2 ，由式(4)知：

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+D}} \quad (5)$$

根据公式(3)和(5)可以得到在不同高度卫星时目标相对跟踪系统的最大仰角其结果参见表 1。由表 1 可得：望远镜设计方位角速度最大值为 $10^\circ/\text{s}$ ，卫星高度越高时，目标相对跟踪系统的最大仰角越大^[7]。

表 1 不同高度卫星时目标相对跟踪系统的最大仰角

卫星离地 D/km	速度 $v/(\text{km/s})$	最大仰角 $E_m/(\circ)$
300	7.73	81.6
500	7.62	85.0
1 000	7.35	87.6
5 000	5.92	89.6
10 000	4.94	89.8

2 基墩改造要求分析

图 2 为天文圆顶结构截面图，圆顶呈超半球状，圆顶半径 5.1 m，圆顶球心距离圆顶内部地面 2.740 m。该圆顶可周向 360° 无限制旋转，最大转动速度 $5^\circ/\text{s}$ 。

图 3 为望远镜圆顶内部原放置赤道式望远镜基墩的俯视图，基墩长 3 m、宽 1.6 m，基墩中心在圆顶中心位置偏南 2.2 m 处（望远镜基墩边缘和圆顶的中心偏离为 0.7 m），望远镜的半径为 0.525 m。通过基墩改造后地平式望远镜的转动中心位置：离通过球心的水平面高度为 h ，离球心的水平距离为 d ，根据观测要求确定这 2 个参量。

图 4 为望远镜中心改正侧视图。

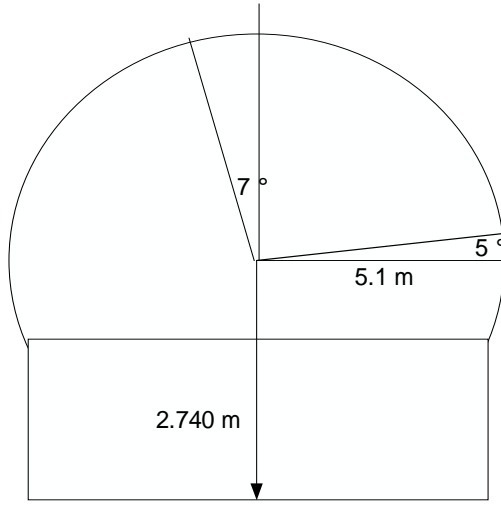


图 2 圆顶结构截面示意图

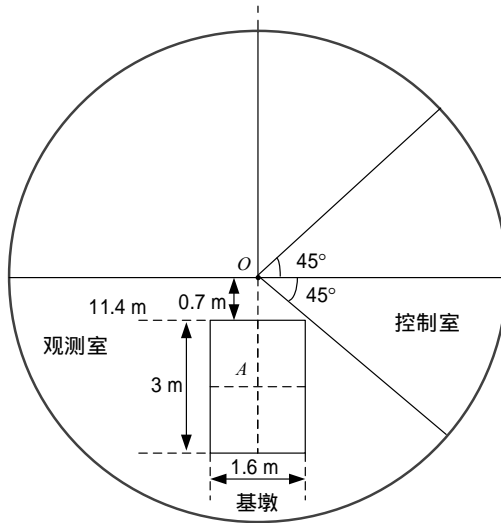


图 3 改造前基墩位置俯视图

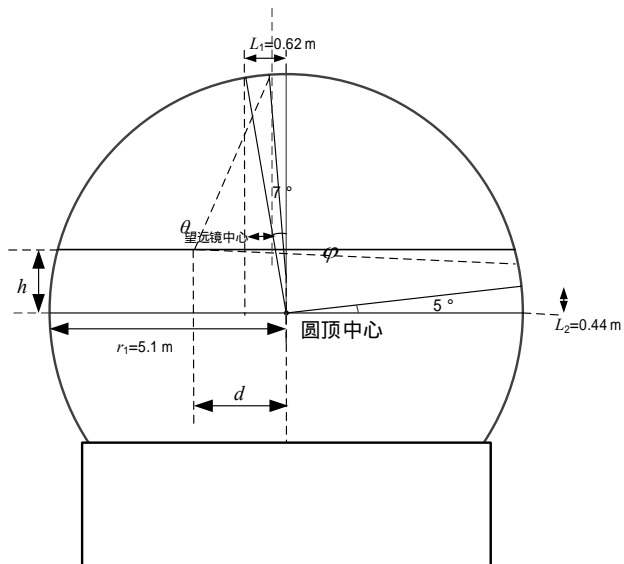


图 4 望远镜中心改正侧视图

θ 为望远镜可观测的最高仰角, 根据图 4 可推出下列等式:

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{r_1^2 - (L_1 - r_2)^2} - h}{d - (L_1 - r_2)} = \frac{\sqrt{5.1^2 - (0.62 - 0.525)^2} - h}{d - (0.62 - 0.525)}, \quad (6)$$

式(6)中, r_1 为圆顶半径, r_2 为望远镜口径半径, L_1 为望远镜在最高仰角观测时的天窗开口长度。

φ 为望远镜最低俯角, 可以用式(7)进行计算:

$$\tan \varphi = \frac{h - L_2 - r_2}{d + \sqrt{r_1^2 - h^2}} = \frac{h - 0.44 - 0.525}{d + \sqrt{5.1^2 - h^2}}, \quad (7)$$

式(7)中, L_2 为望远镜在最低俯角观测时的天窗开口长度。

分析表明望远镜在天顶附近方位角变化很快, 一般仅能观测俯仰角小于 85° 的天体, 望远镜的最小俯仰角为 6° 。综合考虑, 原基墩改造后 d 最大为 0.5 m, 望远镜中心距离圆顶中心水平高度 h 要求小于 1.06 m, 可视仰角大于 87° 。

为不影响正常观测, 需将原放置望远镜的基墩向北移动并升高, 同时又要考虑到原建筑的基建基础, 使改造距离尽可能的小, 假定改造完成后的望远镜中心比圆顶中心偏南 S (单位: m), 偏高 T (单位: m)。现分别对望远镜和圆顶在观测目标时的角度进行分析, 分别以望远镜转动中心和圆顶球心为坐标系原点建立坐标系, 其中, 两个坐标系的坐标轴指向相同。向东为 x 轴正向, 向北为 y 轴正向, 向上为 z 轴正向。这两个坐标系关系如图 5 示。

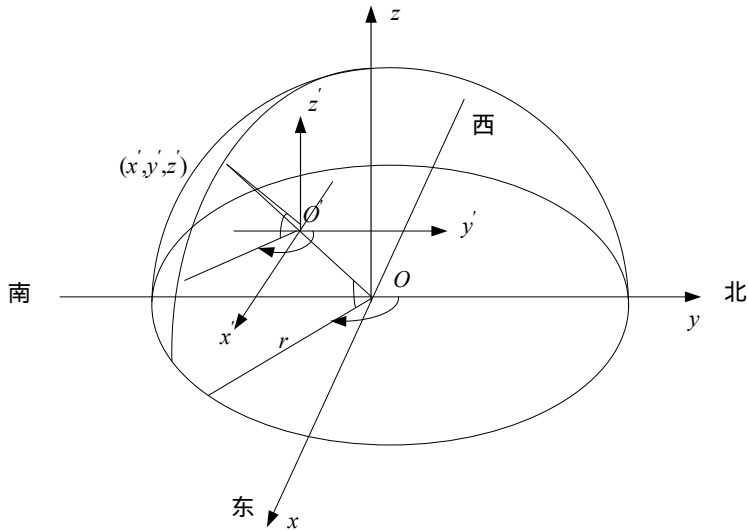


图 5 望远镜中心和圆顶球心的位置关系

对于空间中任一观测目标, 在这两个坐标系中, 有如下关系:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ S \\ -T \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式(8)中, (x', y', z') 表示空中目标在以望远镜转动中心为原点的地平式坐标中的位置坐标, (x, y, z) 表示空中目标在以圆顶球心为原点的地平式坐标系中的位置坐标。假设该目标距离圆顶球心的距离为 R , 从圆顶球心观测的方位角和高度角分别为 A 和 H , 则有:

$$\begin{cases} x = R \sin A \cos H \\ y = R \cos A \cos H \\ z = R \sin H \end{cases}, \quad (9)$$

代入到式(8)中得到：

$$\begin{cases} x' = R \sin A \cos H \\ y' = R \cos A \cos H + S \\ z' = R \sin H - T \end{cases}. \quad (10)$$

在以望远镜为中心的地平坐标系中，望远镜观测该目标的方位角 A 和仰角 H 分别为

$$\tan A' = \frac{x'}{y'} = \frac{R \sin A \cos H}{R \cos H \cos A + S} = \frac{\tan A}{1 + \frac{S}{R \cos H \cos A}}, \quad (11)$$

和

$$\tan H' = \frac{z'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} = \frac{R \sin H - T}{\sqrt{(R \cos H \sin A)^2 + (R \cos H \cos A + S)^2}} = \frac{R \sin H - T}{\sqrt{R^2 \cos^2 H + S^2 + 2RS \cos H \cos A}}. \quad (12)$$

对于一般的地平式结构的观测设备而言，只有观测目标出现在当地地平以上才有可能观测到目标，也就是说，对于 H 而言，最小值应为 0° ，将此值代入到式(12)中，可以得到：

$$R \sin H - T = 0, \quad (13)$$

式(13)中， H 是以圆顶球心为观测点的观测仰角，由于在设计圆顶时，天窗开口角度为 $5^\circ \sim 97^\circ$ ，因此，在以圆顶球心为观测点时，可以观测高度角为 $5^\circ \sim 90^\circ$ 的目标。另外考虑到望远镜本身的尺寸，实际上能观测到的最低仰角为 6° 左右，将此结果代入到式(13)，可以求解出 T ^[8]：

$$T = R \sin 6^\circ = 500 \text{ mm} = 0.5 \text{ m}. \quad (14)$$

根据表(1)，当观测轨道高度约为 500 km 的目标时，根据提前设计的望远镜最大方位角速度，该望远镜所能观测到的最高仰角约为 85° ，根据提前设计的圆顶天窗开口角度，天窗开口角度最大时，该点距离圆顶中心线 L_1 约 0.62 m，圆顶半径 r_1 为 5.1 m，望远镜镜片半径 r_2 为 0.525 m，当望远镜及圆顶观测方位角都为 0° 时，此时望远镜观测仰角最高为：

$$\tan H'_{\max} = \frac{r_1 - T}{S + r_2 - L_1} = \frac{5.1 - T}{S + \frac{1.05}{2} - 0.62}. \quad (15)$$

将式(14)计算得到的 T 代入，得到 $S = 0.495 \text{ m}$ 。望远镜底部基座长 2 m，若将望远镜放在基墩最北侧，还需将基墩位置向北加长 $0.7 - 0.495 + 1 = 1.205 \text{ m}$ 。综上，针对该基墩位置，应升高 0.5 m，向北加长 1.205 m，以满足新的地平式望远镜的观测需求^[9]。

3 偏心圆顶随动补偿分析

天体的位置一般使用天球的赤道坐标（赤经和赤纬）来表示，而圆顶位置则使用地平坐标（地平方位角）描述，圆顶随动的任务就是根据观测目标的赤道坐标解算出圆顶的地平方位角，根据当前位置和目标方位的差值控制圆顶旋转使天窗时刻跟随望远镜运动，以便望远镜随时可以观测到目标。当望远镜光学中心和圆顶球心重合时，圆顶的地平坐标和望远镜的赤道坐标转换关系为：

$$A = \arctan \frac{\cos \delta \sin \tau}{\cos \delta \sin \phi \cos \tau - \sin \delta \cos \phi}, \quad (16)$$

$$Z = \arctan \frac{\cos \delta \sin \phi \cos \tau - \sin \delta \cos \phi}{\cos A (\cos \phi \cos \delta \cos \tau + \sin \delta \sin \phi)}, \quad (17)$$

式(16)和(17)中, δ 为赤纬, τ 为时角, ϕ 为望远镜安装地点的地理纬度角(骊山为 $+34.357^\circ$)。由于望远镜与圆顶的中心不重合问题所造成的误差, 应该使用有修正项的赤道坐标-地平坐标转换公式:

$$A = \arctan \left[\frac{\cos \delta \sin \tau - \frac{a}{l} \cos \tau}{\left(\cos \delta \cos \tau + \frac{a}{l} \sin \tau \right) \sin \phi - \sin \delta \cos \phi} \right], \quad (18)$$

$$Z = \arctan \left\{ \frac{\sin \phi \left(\cos \delta \cos \tau + \frac{a}{l} \sin \tau \right) - \cos \phi \sin \delta}{\cos A \left[\sin \delta \sin \phi + \left(\cos \delta \cos \tau + \frac{a}{l} \sin \tau \right) \cos \phi \right]} \right\}, \quad (19)$$

式(18)和(19)中, a 为镜筒中心轴线到赤经轴线的距离, l 为圆顶半径, 本圆顶为 5.1 m, A 为圆顶天窗中轴线的方位角, Z 为天窗风帘孔中心的天顶距, (A, Z) 为观测目标的地平坐标, 地平方位角定义正南为 0° , 西向为正方向, 是圆顶随动所需的关键数值^[10-11]。天窗地平高度角为 5° , 实际可用为 6° 。由于天窗开口角度较大, 所以在控制时只做方位随动控制。

由于望远镜的转动速度和加速度的限制, 地平式望远镜在天顶附近一个小区域内无法对天体进行跟踪观测, 这一小区域就是地平式望远镜的天顶盲区。已知望远镜和圆顶的中心偏离为 2.2 m (图 3 所示), 表明圆顶中心的水平距离 d 都和圆顶半径 r 的关系呈负相关 (d 越大, r 越小)。综合考虑所有约束条件, 观察表格由以上分析可知: 当 θ 无限趋近于 85° , ϕ 无限趋近于 1° 时, 望远镜中心与圆顶中心的水平距离 d 无限趋近于 0.4 m, 此时的测量结果与理论值在约束条件下最为接近: $\theta \rightarrow 85^\circ$, $\phi \rightarrow 1^\circ$ 时, $d \rightarrow 0.4$ m。

根据基墩结构得到最佳改造方案示于图 6 ($OA' = 0.4$ m): 基墩向中心移 0.3 m (0.7 m - 0.4 m)。这是根据望远镜的俯仰角的实际观测范围来确定最合适的位置, 即同时确定最合适的望远镜中心的地面高度和望远镜中心与圆顶中心的水平距离, 满足了望远镜观测角度对位置的约束。

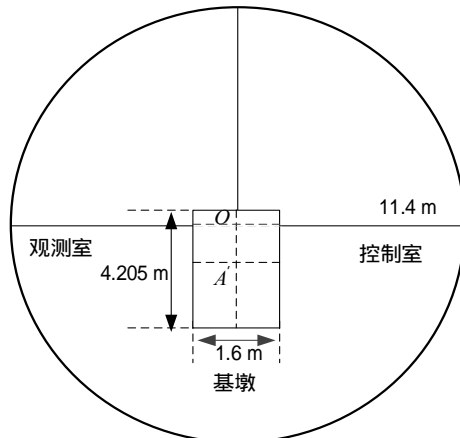


图 6 改造后的基墩示意图

当 $A = 0$ 时，由式 (12) 不难推出最高点的高度角 H' 为：

$$\tan H'_{\max} = \frac{R-T}{\sqrt{R^2+S^2}} = \frac{510-50}{\sqrt{510^2+30^2}} = 7.7966。 \quad (20)$$

得到最高点的高度角 $H' = 86^\circ$ 。因此望远镜一般在高度角在 $0^\circ \sim 85^\circ$ 进行观测。

望远镜圆顶为一维运动，即望远镜观测角度和天窗观测角度的关系为：

$$\Delta A = A' - A, \quad (21)$$

$$\tan A' = \tan(A + \Delta A) = \frac{\tan A + \tan \Delta A}{1 - \tan A \tan \Delta A} = \frac{\tan A}{1 + \frac{S}{R \cos A \cos H}} \approx \tan A + \tan \Delta A, \quad (22)$$

公式 (22) 可近似为

$$\tan A' = \tan A \left(1 - \frac{S}{R \cos A \cos H} \right) = \tan A \left(1 - \frac{0.3}{5.1 \cos A \cos H} \right)。 \quad (23)$$

综上所述，通过推出圆顶天窗中轴线的方位角 A 改造前后的关系，针对改造后的 1.05 m 激光望远镜，首先应该精确测量出望远镜中心与圆顶球心的不重合度偏差，然后根据使用有修正项的赤道坐标-地平坐标转换公式计算出望远镜在不同指向下，与圆顶天窗方位角之间的偏差，在随动系统程序中予以补偿，从而提高圆顶随动系统的精确程度，满足了项目的需求^[12-13]。

实测天窗的宽度为 2.388 m，天窗对圆顶中心的张角为 $2 \times \arcsin(1.194 / 5.45) \approx 25.3^\circ$ ，而望远镜视场角 $2 \times \arcsin(0.525 / 10.9) \approx 5.5^\circ$ 。因此，望远镜口径对天窗的余量超过 19.8° ，望远镜观测角度在小于或者等于 19.8° 时不影响观测，利用这个余量可以适当降低随动精度的要求^[8]。

4 结论

本文对国家授时中心改造前后的 1.05 m 激光望远镜进行了对比，解释了改造为地平式望远镜的原因，并详细阐述了望远镜与圆顶偏心造成的影响。根据望远镜的基墩实际情况和俯仰角的实际观测范围确定了基墩中心最合适的位置，即根据地平式望远镜观测原理通过高度角和方位角计算了望远镜跟踪角度及圆顶角度，同时确定最合适的望远镜中心的地面高度和望远镜中心与圆顶中心的水平距离：基墩升高 0.5 m，向中心移 0.3 m，向北加长 1.205 m，以满足新的地平式望远镜的观测需求。降低望远镜的中心偏心问题带来影响，满足了激光望远镜的随动系统设计的总体需求。最后对望远镜随动系统的精度进行了分析，得到了望远镜观测角度和天窗观测角度的关系，给出了望远镜偏离天窗而不影响观测的角度范围，为今后激光测距望远镜的研究打下了良好的基础^[14]。

参考文献：

- [1] 张忠萍, 杨福民. 卫星激光测距的新进展[J]. 天文学进展, 2001, 19(2): 283-288.
- [2] 李祝莲. 1.2 m 地平式望远镜跟踪性能研究[D]. 昆明: 中国科学院研究生院(云南天文台), 2005.
- [3] 冯和生, 熊耀恒, 张云成, 等. 1.2 米地平式望远镜轴系的精密检测及结果分析[J]. 天文研究与技术, 1991(4): 1-6.
- [4] 张景旭. 地基望远镜塔台圆顶结构形式及设计原则[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 126-132.
- [5] 王志臣, 张艳辉, 乔兵. 望远镜跟踪架结构形式及测量原理浅析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(1): 18-21.

- [6] 王慧, 崔连延. 太阳高度角和方位角的计算算法[J]. 电子技术与软件工程, 2015(17): 167-167.
- [7] 游安清, 张家如. 地平式跟踪系统中目标角速度与角加速度分析[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(S1): 96-100.
- [8] 高杰, 肖宏玲, 姜晓君. 一种基于 AS-I 总线的圆顶随动系统[J]. 天文研究与技术, 2004(3): 196-202.
- [9] 赵有, 樊仲维, 高鹏骐. 激光测距对非合作目标观测的研究及一些问题的思考[C] // 第六届全国空间碎片学术交流会论文集, 成都: 国家国防科技工业局系统工程一司, 2011: 22-29.
- [10] 陆栋宁, 黄垒, 陈颖为, 等. 85 cm 天文望远镜圆顶和天窗自动化系统研制[J]. 天文研究与技术, 2008, 5(4): 386-391.
- [11] 黄宗福, 汪金真, 陈曾平. 光电探测中空间目标和恒星目标运动特性分析[J]. 光电工程, 2012, 39(4): 67-72.
- [12] 李敏, 张昂, 张俊波, 等. 大口径望远镜主镜径向偏心误差检测技术[J]. 激光与电子学进展, 2017, 54(9): 188-195.
- [13] 杨福民, 谭德同, 肖焯焜. 上海天文台第三代卫星激光测距系统[J]. 中国科学(A 辑 数学 物理学 天文学 技术科学), 1990(8): 844-850.
- [14] 陈涛, 陈娟, 王旭超. 光电经纬仪跟踪架结构模式浅析[J]. 吉林学院学报(自然科学版), 2002(3): 19-22.