

地月激光测距角反射器研制进展*

刘祺¹, 何芸^{2,3}, 段会宗¹, 叶贤基¹, 徐家豪¹, 艾凌皓¹

1. “天琴计划”教育部重点实验室, 中山大学天琴中心 & 物理与天文学院, 天琴前沿科学中心, 国家航天局引力波研究中心, 广东 珠海 519082
2. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072
3. 武汉大气遥感国家野外科学观测研究站, 湖北 武汉 430072

摘要: 月球激光测距在广义相对论的检验以及地月系统的理解上做出了巨大贡献。然而由于月球天平动效应的影响, 约 50 年前安置在月球上的阵列式角反射器将单个回波光子的测距精度限制在了厘米级的水平。为了进一步提升测距精度, 需要部署新一代单体大孔径的激光角反射器。本文主要介绍我们 170 mm 有效孔径的中空激光角反射器的研制进展。测试结果表明, 我们实现了空心激光角反射器三个二面角的精度分别为 0.10", 0.30" 和 0.24"。远场衍射图样模拟表明, 该样机能够达到理想 Apollo 11/14 反射器阵列 68.5% 返回信号强度。我们期望这种空心激光角反射器可以应用于新一代的月球激光测距。

关键词: 地月激光测距; 激光角反射器

中图分类号: O435.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 01-0239-08

Progress on the design of retroreflector for lunar laser ranging

LIU Qi¹, HE Yun^{2,3}, DUAN Huizong¹, YEH Hsienchi¹, XU Jiahao¹, AI Linghao¹

1. MOE Key Laboratory of TianQin Mission, TianQin Research Center for Gravitational Physics & School of Physics and Astronomy, Frontiers Science Center for TianQin, CNSA Research Center for Gravitational Waves, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China
2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China
3. State Observatory for Atmospheric Remote Sensing, Wuhan 430072, China

Abstract: Lunar laser ranging has made great contributions to the tests of general relativity and the understanding of the Earth-Moon system. However, because of the lunar libration, corner cube retroreflector arrays installed on the Moon about 50 years ago currently limit the laser-ranging precision for a single photon received to centimeter level. Here we mainly introduce the latest progress of developing a 170 mm aperture single and hollow corner cube retroreflector. The measurement shows that three dihedral angle offsets realize 0.10, 0.30, and 0.24 arcsec, respectively. According to the simulation of far field diffraction pattern, this prototype can achieve about 68.5% optical intensity reflected from ideal Apollo 11 or 14 arrays. We anticipate that this hollow corner cube retroreflector can be applied to the next generation lunar laser ranging.

Key words: lunar laser ranging; retroreflector

* 收稿日期: 2020-11-06 录用日期: 2020-11-22 网络首发日期: 2021-01-08

基金项目: 广东省基础与应用基础重大项目(2019B030302001); 国家自然科学基金 (11655001)

作者简介: 刘祺 (1981年生), 男; 研究方向: 精密测量物理; E-mail: liuq239@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 何芸 (1987年生), 男; 研究方向: 精密光学器件与激光雷达; E-mail: heyun@whu.edu.cn

1 引言

地月激光测距 (Lunar Laser Ranging, LLR) 是指利用激光脉冲往返与地月之间的时延来精确测量地球和月球之间的距离, 如图 1 所示。

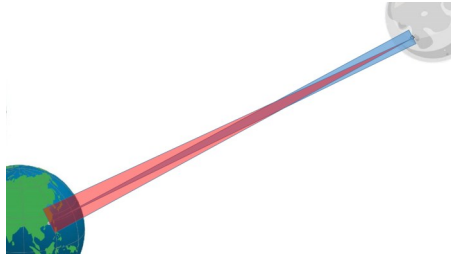


图 1 地月激光测距原理图

Fig. 1 The principle of Lunar laser ranging

地月测距对于基础引力理论研究具有极其重要的价值^[1-9], mm 量级的地月测距精度将给出如下几个实验以最高的检验精度:

- 1) 强等效原理 (SEP): 约 3×10^{-5} ;
- 2) 弱等效原理 (WEP): $\Delta a/a \sim 10^{-14}$;
- 3) 引力常数 G 随时间的变化: $\dot{G}/G \approx 10^{-13}/\text{year}$;
- 4) 大距离下牛顿反比定律($1/r^2$): 约 5×10^{-12} ;

此外, 月球激光测距也为地月系统的研究提供包括月球内部信息在内的重要实验数据。在地球参考系和世界时的确立方面, 也起着重要的作用^[10-11]。

月球激光测距的思想起源于 20 世纪 50 年代末, 当时普林斯顿大学的 R. H. Dicke 和同事们试图寻找引力常数随时间的可能变化。他们仔细考虑了在卫星上安装角反射器, 并在地面利用脉冲探照灯照亮的测量方式进行测距^[12]。直至 20 世纪 60 年代, 第一台红宝石脉冲激光器问世, 科学家们意识到利用激光测距可以实现更高的精度。1962 年, 麻省理工学院的 Smullin 和 Fiocco 成功探测到从月球表面上漫反射回来的激光脉冲。1964 年 10 月, 美国 NASA 发射了第一颗带有后向角反射器的卫星“Beacon-B”, 并很快实现了卫星激光测距 SLR (Satellite Laser Ranging)。随后, 美国科学家提出将激光角反射器放置于月球表面, 以开展针对合作目标的月球激光测距。1969 年 7 月 21 日, 阿波罗 (Apollo) 11 号将第一块阵列式的角反射器平板布置在月面上^[13]。次月, 美国的 Lick 天文台便成功实现了对 Apollo 11 角反射器的测距。随后, 美国麦克唐纳 (McDonald) 天文台也成功

获取来自 Apollo 11 的测距数据, 继而开始了长期的月球激光测距工作。

从 20 世纪 70 年代初系统的月球激光测距实验开展以来, 地面观测站经历了两轮主要的革新, 使得测距精度从早期 (1970~1984 年) 的 20 cm 量级推进到后来 (1985~2006 年) 的 2.5 cm 量级。2007 年后, 美国阿帕奇点 (Apache Point) 天文台通过借助优良的选址、更好的激光技术、时间测量技术、阵列式的探测器和 3.5 m 大口径的望远镜等手段来收敛光束和提高光子探测能力, 极大增加了在单位时间内探测得到的回波光子数目。通过统计方法, 将单个标准数据点的测距精度提升到毫米级别, 是目前精度最高的地月测距实验^[14-15]。法国蔚蓝海岸的 Grasse 激光测距台站自 1981 年开始得到月球的测距回波信号, 是世界上产出月球激光测距数据最多的台站^[16-17]。2017 年, 他们首次实现了利用 1 064 nm 近红外激光的地月距离测量, 由于激光波长增加导致的大气透过率提升, 这套新的月球激光测距系统甚至可以在新月和满月阶段开展观测工作^[18]。我国云南天文台于 2018 年首次实现了国内的月球激光测距^[19]。

当前月球激光测距实验都是利用美国和前苏联于 20 世纪 70 年代初留在月球表面上的反射装置开展。目前月球上共有 5 个阵列式的角反射器 (图 2), 它们分别是美国阿波罗登月计划过程中安装的 Apollo 11、14 和 15 号反射平板, 以及安装在前苏联月球车 Lunakhod 1 和 2 号上, 由法国制造的角反射阵列 (图 3)。这些角反射器全部在 1969~1973 年期间部署在月球表面。

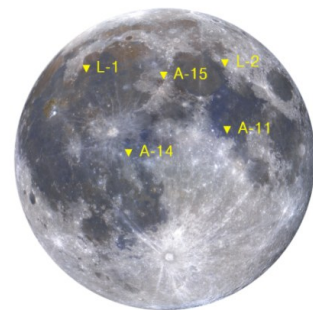


图 2 月面现有反射器分布

(A: Apollo; L: Lunakhod)

Fig. 2 The location of current retroreflectors on the Moon

(A: Apollo; L: Lunakhod)

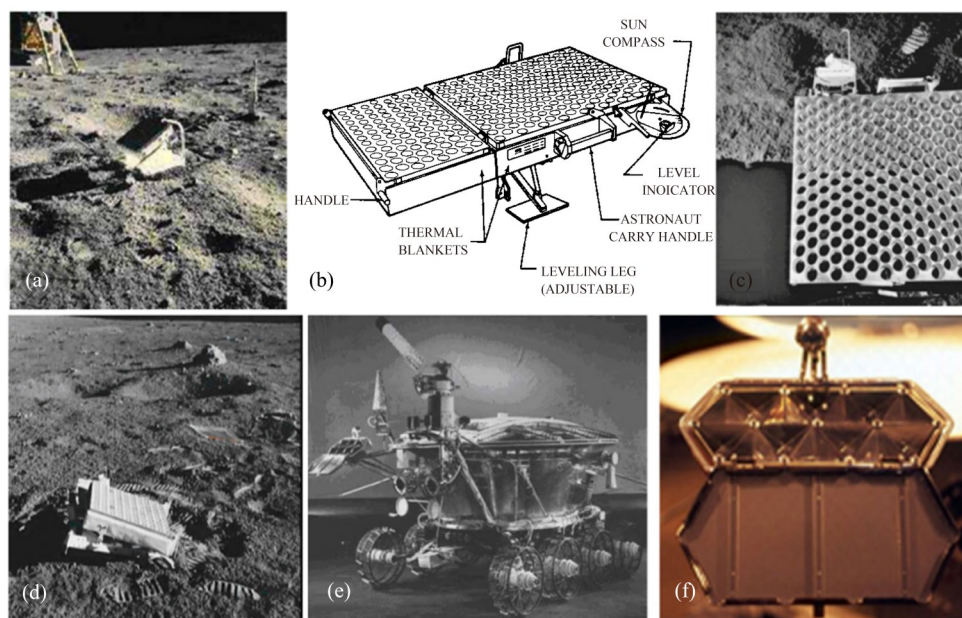


图3 Apollo 11 (a)、14 (d)、15 (b和c) 号角反射器和 Lunokhod 2月球车 (e) 及反射器 (f)
 Fig. 3 The Apollo 11 (a), Apollo 14 (d), Apollo 15 (b and c) retroreflector arrays and the retroreflector arrays (e) on Lunokhod 2 rover (f)

从阿帕奇点天文台月球激光测距系统的误差评估表中可以看出, 当前月球表面上的激光角反射器阵列是当前测距精度误差的主要来源^[14]。月球绕地球运动过程中, 存在一种称为“天平动”的运动模式, 这个运动模式会使得激光角反射器阵列平面相对于地球发生 $\pm 8^\circ$ 的倾斜^[20]。系统无法区分接收到的某个光子来自阵列中的哪个角锥, 这将导致返回的激光脉冲发生展宽从而产生 ± 7 cm 且无法扣除的测距误差, 见图4所示。该误差已成为当前月球激光测距误差中的主要误差源。该误差在更换单体角反射器后可以消除。

此外, 现有的激光角反射器阵列已经使用了超过 50 年, 由于恶劣的月面温度和辐照环境和月

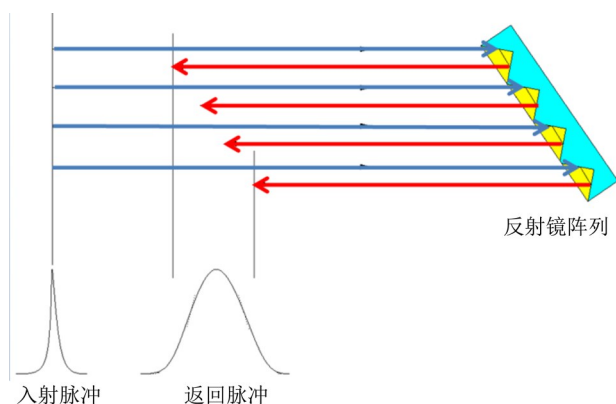


图4 阵列式角反射器导致激光脉冲展宽

Fig. 4 The laser pulse was widened due to the array structure

尘覆盖等因素的影响, 它们的反射性能已经衰减至原来的约 1/10^[21]。因此, 为了实现毫米级地月测距精度, 目前最可行方法是在月面布置新的单体大孔径角反射器。

如果采用只有单一光学中心的角反射器 (如图 5 所示), 测距精度将不再受角反射器指向变化的影响。同时通过增大其有效孔径, 可以进一步压缩反射光束的发散角 (即相应的衍射极限可以压缩)。因此, 能以更小的面积实现与原有大型阵列式角反射器接近的反射性能。这种情况下, 一个阿帕奇点天文台级别的地面测距站有望实现单脉冲 1 mm 的测距精度, 从而推动在科学研究上有更多的产出。

与实体的角锥相比, 入射到空心角锥的光仅会被表面上镀层反射, 而不会穿过棱镜材料。此时, 三个反射平面的两两之间的二面角直角精度和镀膜特性决定了空心角锥的光学性能, 即空心角锥的玻璃材料本身的不均匀性不会影响其光学性能。此外, 在质量相同的情况下, 厚度为 15 mm 的空心角锥的孔径比实体角锥大 60%, 这意味着可以反射更多的激光信号。

为了接收足够的测距光子, 必须严格控制空心角反射器的发散角, 以实现更为汇聚的远场衍射光斑。根据模拟, 用于激光地月测距的单个空心 CCR 的二面角偏差应与理想直角具有亚角秒级别的偏差^[20-21]。采用碱性催化键合 (HCB) 技术

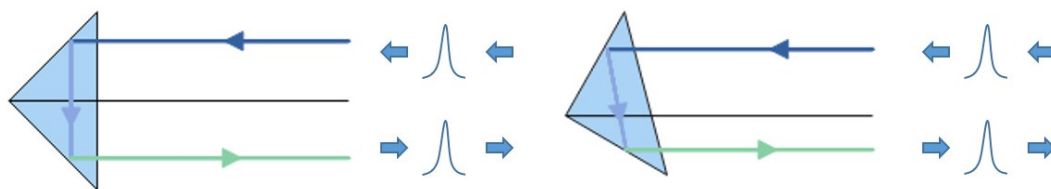


图5 单体角反射器具有的唯一反射中心，入射角度不影响测距精度

Fig. 5 The single retroreflector has only one reflect center

来组装空心角反射器是一种非常有潜力的技术^[22]，这种黏接技术具有黏接强度高（根据我们的实验，拉伸屈服强度 $> 10 \text{ MPa}$ ），能够承受航天任务中的发射时候的剧烈振动和冲击。

2 角反射器技术要求

根据 Otsubo 等^[23]的计算，用于实现 LLR 的单体角反射器若要获得与 Apollo 系列角反射器阵列接近的反射性能，其最佳的孔径和二面角偏移（偏离理想直角）分别为 $150\sim 250 \text{ mm}$ 和约 $0.3''\sim 0.4''$ 。因此，我们计划研制一个有效孔径为 170 mm 的空心角反射器，以适用于新一代毫米级精度的月球激光测距。角反射器的设计需要考虑反射性能和技术难度的平衡。而根据文献 [24] 中的数值模拟结果，当二面角偏移量最大为 $0.7''$ 时，该尺寸的光学性能仍可以达到相同的数量级（是最大衰减量的 6.6 倍），可预期反射光强度为理想 Apollo 11 角反射器的 13.1%。当二面角的直角偏差超过 $0.7''$ 时，台站可接收到的反射光强度会迅速衰减，因为集中的环形图案偏离了月球像差区域（远场为 $0.7''\sim 1.4''$ ）。单一大口径的角反射镜有两种设计方案，分别为实体角锥和空心角锥。

2.1 实体角锥

将 Apollo 系列角反射器阵列中使用的 3.8 mm 口径实体角锥直接增大至 100 mm 是一个非常直接的想法。利用实体角锥有如下优点：可以灵活选择镀膜或者不镀膜。由于月球上的环境恶劣，镀层和棱镜直接的黏合会有可靠性的问题，长时间使用镀膜可能脱落。而实体反射棱镜可以用内部全反射进行反射，避免了镀膜带来的可靠性问题。但是全反射对光线的入射角度有要求，使得角锥的有效反射面积减小。其次，实体角锥结构较为稳固，安装的设计相对简单和可靠。

然而，大口径的实体角锥也有如下几个缺点：① 大口径实体角锥质量较大；② 大口径角锥的加工难度大。对于 100 mm 的角锥，其三个底面的二

面角误差要小于 $0.2''$ ，这样的加工精度超过当前 38 mm 口径角锥的加工精度的 2.5 倍。③ 实体角锥对其材料内部的均匀性要求非常高。如果其光学材料的均匀性较差，会造成光线在其内部发生色散效应，使得反射光的发散角变大，导致接收到的信号变得更弱。尺寸越大，满足材料均匀性的要求也会越发困难。④ 对温度梯度的影响更敏感，温度梯度一方面会使得角锥发生形变，从而改变内部的折射率。即便是一个密度非常均匀的理想角锥棱镜，受不同角度的太阳光照射产生温度梯度后，其内部的折射率均匀性会大大降低，同样会导致色散效应的发生。

2.2 空心角锥

和实体角锥棱镜相比，空心角锥棱镜有如下优点：① 相同口径的空心角锥的质量比实体角锥要小。因此在相同质量负荷的情况下，可以使用较大口径的空心角锥，以提高反射效率，增大回波信号。② 温度梯度的影响相对实体棱镜较小。对于空心棱镜来说，光线未进入棱镜材料内部，因此温度梯度带来的材料密度变化对光线的反射没有影响，只需要考虑温度梯度带来的反射面平面度变化和二面角的偏离。

空心角锥也有如下几个缺点：① 无法像实体棱镜那样一体加工，必须用三片零件用胶水黏接。这样对黏接的强度和黏接效果的可靠性提出了相当高的技术要求，一方面要满足发射时候产生的巨大加速度，另一方面要保证月球上热胀冷缩时，胶水连接处的形变足够小。② 由于空心棱镜需要加工后拼接，制作难度从实体棱镜的高精度打磨转移到高精度的黏合上。③ 空心棱镜无法使用全反射来反射光线，因此必须在反射面上镀高反射膜，这对反射膜在极端环境下的长期可靠性提出了新的要求。

近 10 年来，国际上几个研究团队为下一代激光地月测距提出了新的激光角反射器设计方案^[25-31]。这些方案都采用了单一结构的角锥棱镜

以克服月球天平动的影响。美国马里兰大学的 Currie 等正与来自意大利的研究小组研制以熔融石英为材料制造的 100 mm 实体角反射器^[25-26, 31]。该角反射器的相对信号强度为月面上 Apollo 11 和 14 阵列的初始性能的 20%。美国喷气动力实验室 (JPL) 的 Turyshv 等提出了一种 170 mm 口径的空心角反射器设计方案, 其反射性能与月球上最大的 Apollo 15 CCR 阵列相当^[27]。日本国家天文台的 Araki 等正在开发一种使用单晶硅为 LLR 设计的具有 200 mm 孔径的空心角反射器, 目前正处于工艺验证阶段^[30]。根据 Otsubo 等的模拟, 二面角偏差为 0.35" 的 200 mm 空心角反射器, 其远场衍射光斑 (FFDP) 强度比 Apollo 11 和 14 大 50%。Oreb 等为美国国家航空航天局 (NASA) 的空间干涉测量任务 (SIM) 开发了一个双空心角锥, 其孔径约为 73 mm^[32]。利用光胶技术将用于反射的玻璃面黏合在一起, 可实现各个二面角偏差均优于 0.4"。他们还使用化学黏合技术制造了相同尺寸的双空心角锥。每个原型的二面角偏移分别为 1.68", 0.03" 和 1.6", 以及 1.90", 0.07" 和 0.50"^[33]。

3 大孔径空心角反射器的研制

根据前人工作的分析讨论, 充分考虑实体角锥和空心角锥的优缺点后, 我们选择空心角锥作为制作方案^[24, 34]。如图 6 所示, 空心角反射器由三片精密加工的光学玻璃黏接而成, 这里面的关键技术就是三片镜片的黏接工艺, 我们利用碱性催化黏结技术来进行黏接。这种黏接技术具有黏接强度大, 可靠性高的优点。

先将镜片 2 黏接在镜片 1 上。镜片 1 与镜片 3 之间的角度是通过镜片 1 的加工来保证的。然后再粘上镜片 2, 镜片 2 与镜片 1 之间的角度同样是由镜片 2 的加工来保证。而镜片 2 与镜片 3 之间的角度需要在黏接的过程中实时测量, 然后根据测量结果调整镜片 2 与镜片 3 之间的角度。

镜片 2、3 与底面 1 之间的垂直度通过其自身侧垂保证, 而角反射器二面角精度要求在 0.7" 以内, 那么镜片 2/3 的侧垂精度则必须控制在亚角秒量级。亚角秒精度侧垂的加工工艺, 需要在加工过程中进行反复的面型和角度测量, 这对加工和检测的要求, 均已接近目前加工和检测技术的极限。镜片 2 与镜片 3 之间的角度需要实时测量与调整。碱性催化黏接工艺要求黏接和调装过程在 30 s 内完成, 这对测量精度和测量时间均提出了非常

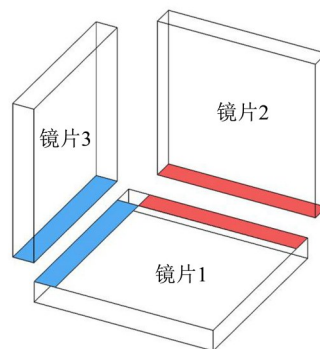


图 6 空心角反射器黏接方案示意图

Fig. 6 The process of the manufacture of hollow retroreflector

高的要求。因此, 第三个二面角的调装需要一种快速高效的亚角秒精度的测量方法。我们设计了一套利用两个准直仪系统的测量方案, 达到了我们的需求^[35]。

4 空心角反射器样机的测量结果

图 7 为使用上述方法研制的 170 mm 空心角反射器和整个装配完成的卫星载荷, 已搭载于嫦娥四号月球中继星“鹊桥”上^[36-39]。CCR 有效反射区域之外的一些部分被切掉, 以减轻重量和体积。通过使用 6 in (1 in = 2.54 cm) ZYGO 激光干涉仪

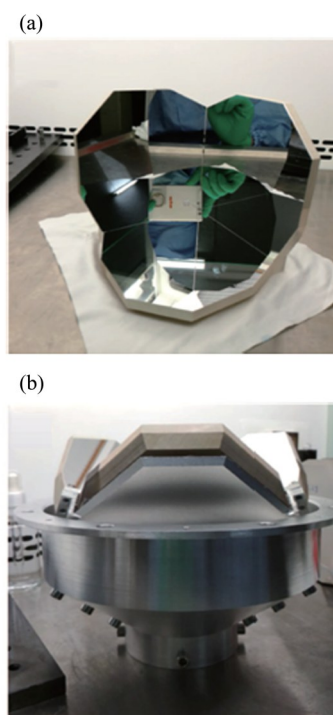


图 7 (a) 孔径为 170 mm 的空心角反射器和
(b) 整个装配完成的卫星载荷

Fig. 7 (a) prototype of a 170 mm hollow retroreflector and
(b) installed on the supporting mounting

测量二面角精度 (如图 8 所示)。三个二面角的偏
移量分别为 0.10", 0.30" 和 0.24"; 其中 0.24" 的

值对应于黏接时需要调节的二面角。

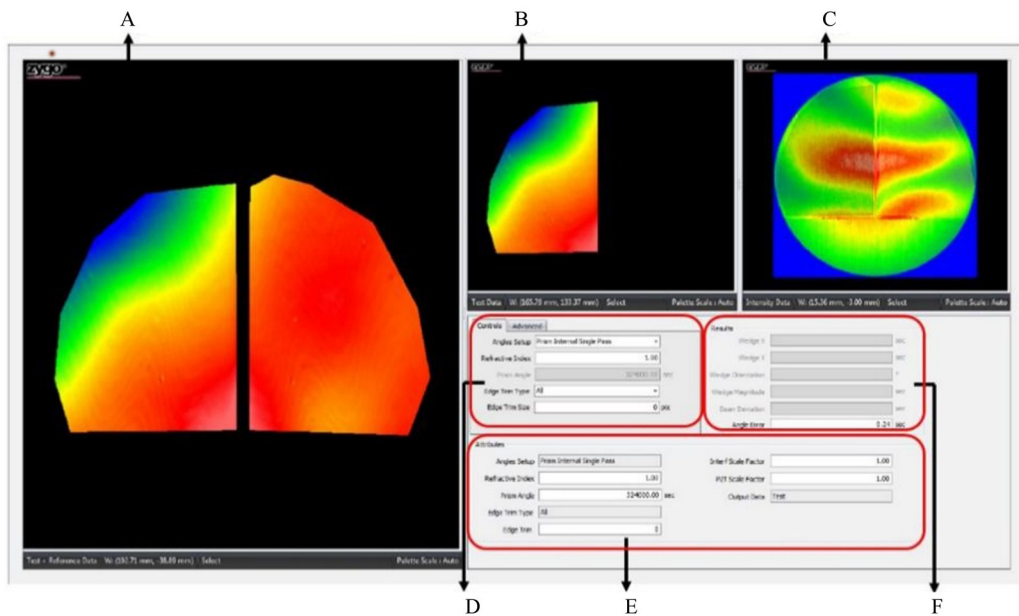
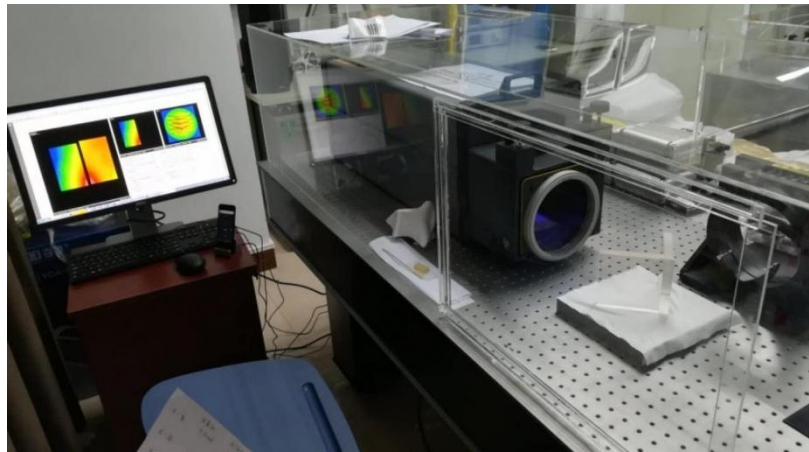


图 8 空心角反射器二面角 ZYGO 激光干涉仪测量实物图和测量结果界面

Fig. 8 Measurement results by ZYGO interferometry

5 展 望

月球激光测距是检验爱因斯坦广义相对论的重要
手段,也是研究地月系统的一项重要试验。目前,
国际上各个测距台站已积累了超过 50 年的测距
数据,测距精度逐年提升但目前处于瓶颈期,原
因是老式的阵列角反射器已不满足毫米级测距
精度的要求。在月面布置新型的大孔径单体空
心角反射器,能将目前的测距精度提升至少 1 个数量

级,从而有望将各个引力物理参数也提升一个数量
级的检验精度,具有重要的科学意义和价值。目前,
我国已有中山大学位于珠海的测距台站和中科院
云南天文台成功实现了月球激光测距,成为当前
国际上仅有的几家具备月球激光测距能力的台站
[19]。因此,同步研究新型的月球激光测距角反
射器,并借着我国后续的月球探测计划安置于月
球表面,将有望使我国在该领域的研究工作达到
国际先进水平 [40-41]。

参考文献:

- [1] ADELBERGER E, HECKEL B, NELSON A. Tests of the gravitational inverse-square law [J]. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2003, 53: 77-121.
- [2] MURPHY T, ADELBERGER E, STRASBURG J, et al. Testing gravity via next-generation lunar laser-ranging [J]. *Nuclear Physics B (Proceedings Supplements)*, 2004, 134: 155-162.
- [3] MÜLLER J, WILLIAMS J, TURYSHEV S, et al. Potential capabilities of lunar laser ranging for geodesy and relativity. *Dynamic Planet [M]*// TREGONING P, et al, eds. *Symposium (Cairns)*, 2007, 130: 903-909.
- [4] MÜLLER J, HOFMANN F, BISKUPEK L. Variations of the gravitational constant from lunar laser ranging data [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2007, 24: 4533-4538.
- [5] MÜLLER J, HOFMANN F, BISKUPEK L. Testing various facets of the equivalence principle using lunar laser ranging [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, 29: 184006.
- [6] WILLIAMS J, TURYSHEV S, BOGGS D. Progress in lunar laser ranging tests of relativistic gravity [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93: 261101.
- [7] WILLIAMS J, TURYSHEV S, BOGGS D. Lunar laser ranging tests of the equivalence principle with the Earth and Moon [J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2009, 18: 1129-1175.
- [8] WILLIAMS J, TURYSHEV S, BOGGS D. Lunar laser ranging tests of the equivalence principle [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, 29: 184004.
- [9] HOFFMANN F, MÜLLER J, BISKUPEK L. Lunar laser ranging test of the Nordtvedt parameter and a possible variation in the gravitational constant [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2010, 522: L5.
- [10] DICKEY J, BENDER P, FALLER J, et al. Lunar laser ranging: A continuing legacy of the Apollo program [J]. *Science*, 1994, 265: 482-490.
- [11] KHAN A, MOSEGAARD K, WILLIAMS J, et al. Does the Moon possess a molten core? Probing the deep lunar interior using results from LLR and Lunar Prospector [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2004, 109: E09007.
- [12] BENDER P, CURRIE D, DICKE R H, et al. The lunar laser ranging experiment [J]. *Science*, 1973, 182 (4109): 229-238.
- [13] ALLEY C, BENDER P, CURRIE D, et al. Laser ranging retroreflector [R]. *NASA Special Publication*, 1971, 214(3918): 163.
- [14] MURPHY T, ADELBERGER E, BATTAT J, et al. The apache point observatory lunar laser-ranging operation: Instrument description and first detections [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2008, 120: 20-37.
- [15] MURPHY T. Lunar laser ranging: the millimeter challenge [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2013, 76: 076901.
- [16] SAMAIN E, MANGIN J F, VEILLET C, et al. Millimetric lunar laser ranging at OCA (Observatoire de la Côte d'Azur) [J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1998, 130(2): 235-244.
- [17] CHABÉ J, COURDE C, TORRE J M, et al. Recent progress in lunar laser ranging at Grasse laser ranging station [J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7: e2019EA000785.
- [18] COURDE C, TORRE J M, SAMAIN E, et al. Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2017, 602: A90.
- [19] 李语强, 伏红林, 李荣旺, 等. 云南天文台月球激光测距研究与实验 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0104004.
- LI Y Q, FU H L, LI R W, et al. Research and experiment of lunar laser ranging in Yunnan Observatories [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0104004.
- [20] OTSUBO T, KUNIMORI H, NODA H, et al. Simulation of optical response of retroreflectors for future lunar laser ranging [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 45: 733-740.
- [21] MURPHY T, ADELBERGER E, BATTAT J, et al. Long-term degradation of optical devices on the Moon [J]. *Icarus*, 2010, 208: 31-35.
- [22] ROBERTSON D, FITZSIMONS E, KILLOW C, et al. Construction and testing of the optical bench for LISA Pathfinder [J]. *Classical Quantum Gravity*, 2013, 30: 085006.
- [23] OTSUBO T, KUNIMORI H, NODA H, et al. Asymmetric dihedral angle offsets for large-size lunar laser ranging retroreflectors [J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, 63: e13-e16.
- [24] HE Y, LIU Q, DUAN H, et al. Manufacture of a hollow corner-cube retroreflector for next generation of lunar laser ranging [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2018, 18(11): 136.

- [25] CURRIE D, DELL'AGNELLO S, MONACHE G, et al. A lunar laser ranging retroreflector array for the 21st century [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68: 667-680.
- [26] MARTINI M, DELL'AGNELLO S, CURRIE D, et al. MoonLIGHT: A USA-Italy lunar laser ranging retroreflector array for the 21st century [J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 74: 276-282.
- [27] TURYSHEV S, WILLIAMS J, FOLKNER W, et al. Corner-cube retro-reflector instrument for advanced lunar laser ranging [J]. *Experimental Astronomy*, 2013, 36: 105-135.
- [28] PRESTON A, MERKOWITZ S. Next-generation hollow retroreflectors for lunar laser ranging [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(36): 8676-8684.
- [29] PRESTON A, MERKOWITZ S. Comparison of fabrication techniques for hollow retroreflectors [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6):065107.
- [30] ARAKI H, KASHIMA S, NODA H, et al. Thermo-optical simulation and experiment for the assessment of single, hollow, and large aperture retroreflector for lunar laser ranging [J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, 68(101): 1-12.
- [31] CIOCCI E, MARTINI M, CONTESSA S, et al. Performance analysis of next-generation lunar laser retroreflectors [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60: 1300-1306.
- [32] OREB B F, BURKE J, NETTERFIELD R P, et al. Development of precision double corner cubes for the Space Interferometer Mission [C/OL]// *Proc SPIE 6292. Interferometry XIII: Techniques and Analysis*, 629202, 2006. <https://doi.org/10.1117/12.680094>.
- [33] BURKE J, OREB B F, PLATT B C, et al. Precision metrology of dihedral angle error in prisms and corner cubes for the Space Interferometry Mission [C/OL]//*Proc SPIE 5869. Optical Manufacturing and Testing VI*, 58690W, 2005. <https://doi.org/10.1117/12.613591>.
- [34] HE Y, LIU Q, HE J, et al. Development of a 170-mm hollow corner cube retroreflector for the future lunar laser ranging [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 10(27): 100701.
- [35] HE Y, LIU Q, HE J, et al. External right-angle measurement using a two-autocollimator system [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(4): 1158-1163.
- [36] HE Y, LIU Q, DUAN H, et al. A 170mm hollow corner cube retro-reflector on Chang'e 4 lunar relay satellite [C]//*Proceedings of the 20th International Workshop on Laser Ranging*. Potsdam, Germany, 2016.
- [37] 何芸,刘祺,田伟,等. 地月第二拉格朗日点卫星激光测距技术研究[J]. *深空探测学报*, 2017, 4(2): 130-137.
- HE Y, LIU Q, TIAN W, et al. Study on laser ranging for satellite on the second Lagrange point of Earth-Moon system [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(2):130-137.
- [38] WU W, YU D, WANG C, et al. Technological breakthroughs and scientific progress of the Chang'e-4 mission [J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63(10): 200201.
- [39] 张立华,熊亮,孙骥,等. 嫦娥四号任务中继星“鹊桥”技术特点[J]. *中国科学(技术科学)*, 2019, 49: 138-146.
- ZHANG L H, XIONG L, SUN J, et al. Technical characteristics of the relay communication satellite “Queqiao” for Chang'e-4 lunar far side exploration mission [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, 49: 138-146.
- [40] SUN X, SMITH D, HOFFMAN E, et al. Small and lightweight laser retro-reflector arrays for lunar landers [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(33): 9259-9266.
- [41] MAZARICO E, SUN X, TORRE J M, et al. First two-way laser ranging to a lunar orbiter: infrared observations from the Grasse station to LRO's retro-reflector array [J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, 72: 113.

(责任编辑 张冰)