



## 新一代单体月球激光角反射器方案设计

何芸, 胡泽主, 黎明, 刘祺, 叶贤基

**Schematic Design of New Generation of Lunar Corner Cube Retroreflector with Single Aperture**

HE Yun, HU Zezhu, LI Ming, LIU Qi, and YEH Hsienchi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20190227003>

## 您可能感兴趣的其他文章

**Articles you may be interested in**

### 地月第二拉格朗日点卫星激光测距技术研究

Study on Laser Ranging for Satellite on the Second Lagrange Point of Earth–Moon System

深空探测学报(中英文) . 2017, 4(2): 130–137

### 同位素热源高温–冲击复合环境试验

High Temperature–Impact Composite Environmental Test on Radioisotope Heat Source

深空探测学报(中英文) . 2017, 4(5): 466–470

### 激光测距通信一体化技术研究及深空应用探索

Study on Integrated Technique of Laser Ranging and Communication and Its Applications in Deep Space

深空探测学报(中英文) . 2018, 5(2): 147–153,167

### $J_2$ 轨道模型对月地激光通信预瞄准精度影响研究

Pointing Accuracy of Lunar–Ground Laser Communication Based on  $J_2$  Perturbation

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(6): 530–536

### “嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计

Design of Chang'E-4 Lunar Farside Soft-Landing Mission

深空探测学报(中英文) . 2017, 4(2): 111–117

### 脉冲激光模拟空间载荷单粒子效应研究进展

Research Progress for Single Event Effects of Space Payloads by Pulsed Laser Simulation

深空探测学报(中英文) . 2017, 4(6): 577–584



关注微信公众号，获得更多资讯信息

# 新一代单体月球激光角反射器方案设计

何芸<sup>1</sup>, 胡泽主<sup>1</sup>, 黎明<sup>2</sup>, 刘祺<sup>1</sup>, 叶贤基<sup>1</sup>

(1. 中山大学 天琴中心 & 物理与天文学院, 珠海 519082; 2. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

**摘要:** 设计了用于新一代月球激光测距 (Lunar Laser Ranging, LLR) 的单体大孔径激光角反射器, 在分析当前国内外研究进展及发展趋势基础上, 介绍了所设计的单体大孔径激光角反射器的整体设计方案, 具体包括: 角反射器的设计和月面安置方案、地面测试方案。验证结果表明: 所设计的单体170 mm孔径空心角反射器, 在532 nm波长的反射光强可达理想“阿波罗11”(Apollo 11) 角反射器阵列的68.5%。该研究预期可将月球激光测距的单个接收光子对应的内符合精度提升至毫米量级。

**关键词:** 月球激光测距; 激光角反射器; 碱性催化粘结; 环境试验

**中图分类号:** P184.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2021)04-0416-07

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20190227003

**引用格式:** 何芸, 胡泽主, 黎明, 等. 新一代单体月球激光角反射器方案设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8 (4): 416-422.

**Reference format:** HE Y, HU Z Z, LI M, et al. Schematic design of new generation of lunar corner cube retroreflector with single aperture[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8 (4): 416-422.

## 引言

月球激光测距 (Lunar Laser Ranging, LLR) 是由地面台站向放置于月面的角反射器发射脉冲激光, 通过精确测量激光脉冲往返时间来测定地月距离。月球激光测距是通过地月系统研究引力的最有效手段<sup>[1]</sup>, 其对基础引力物理的研究有以下重要的科学意义:

1) 等效原理是从狭义相对论跨越到广义相对论的台阶, 是广义相对论的重要基石之一。在现代物理理论中, Nortdtvedt效应预言了由引力自能引起的等效原理存在破缺。地面实验的引力自能通常都很微弱; 月球和地球本身的质量都很大, 因此是验证Nortdtvedt效应的绝佳对象。地球的引力自能是月球的20倍, 且两者的组成成分有很大的差异, 地球有一个很重的铁镍核而月球没有, 因此可通过测量地球和月球在太阳引力场中的加速度之差, 对强等效原理作出检验<sup>[2-4]</sup>。

2) 牛顿反平方定律是牛顿万有引力理论的基础, 已在很大的尺度范围内经受住了检验, 但还是有诸如大额外维模型和翘起额外维模型等模型预言了反平方定律的破缺。高精度的月球激光测距是在月地距离尺度上检验反平方定律的最佳手段<sup>[5-6]</sup>。

3) 利用月球激光测距还可以进行很多其它研究:

万有引力常数随时间的变化的研究, 是研究宇宙演化的重要手段<sup>[7-8]</sup>; 后牛顿参数的精确测量, 对探寻新的度规引力理论具有重要意义<sup>[8-9]</sup>; 地月系统的研究, 可以研究月球内部的密度分布和月球对地球的远离趋势等信息<sup>[10-11]</sup>。

## 1 研究进展与发展趋势

### 1.1 研究进展

20世纪60年代, 第一台激光器的问世为人类提供了开展月球激光测距的机会, 首先出现的是利用月球表面漫反射进行的LLR试验。1964年10月, 美国国家航空航天局 (National Aeronautics Space Administration, 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 (Satellite Laser Ranging, SLR)。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LLR。1969年7月21日, “阿波罗11号” (Apollo 11) 登月成功, 宇航员Armstrong将第一枚激光角反射器放置在月面上。Apollo 11角反射器为100个38 mm孔径的实体角锥组成的阵列。随后, 美国和前苏联又进行了多次载人和无人的登月行动, 并且陆续安放了几个阵列

式的激光角反射器。50年来,当时的科学实验大都随着月面仪器的失效而终止,唯一还在进行的是月球激光测距<sup>[12]</sup>。目前,月球上共有5个角反射器阵列(如图1),它们分别是美国的Apollo 11,“阿波罗14号”(Apollo 14)和“阿波罗15号”(Apollo 15),以及前苏联的“月球17号”(Luna 17)和“月球21号”(Luna 21)。不同国家的激光测距台站还在利用这些角反射器阵列不断获取新的月球激光测距数据<sup>[13]</sup>。2018年1月,中国中国科学院云南天文台成功实现月球激光测距,成为当前国际上为数不多的拥有月球激光测距能力的台站。

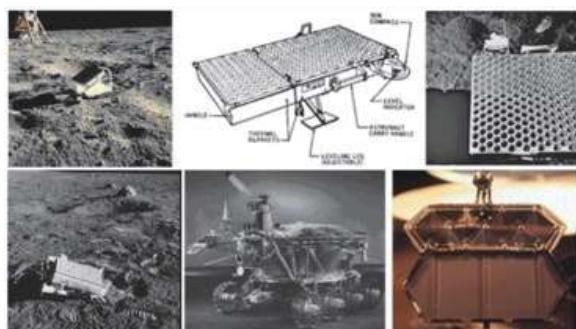


图1 月面现有的5个角反射器阵列<sup>[19]</sup>

Fig. 1 Five corner cube retroreflector arrays on Moon<sup>[19]</sup>

当前,中国有多家单位从事卫星激光角反射器的研制。大部分产品与月面上所放置的角反射器的结构类似,都是小型实体角锥组成的阵列结构。武汉大学电子信息学院的李松等<sup>[14]</sup>对角反射器的理论建模和研制多年的经验,设计研制了搭载于中国“海洋二号”卫星上的激光角反射器。中国科学院上海天文台自1999年起从事激光角反射器的相关理论、实验研究以及卫星激光角反射器载荷研制工作:2002年,为“神舟四号”轨道舱研制了激光角反射器;2005年起,为“北斗”导航卫星研制了20多套激光角反射器<sup>[15]</sup>;2010年,设计和研制了“天宫一号”空间交会对接的激光雷达合作目标。这些激光角反射器大多用于400~36 000 km的地球轨道卫星,采用多个小孔径实体角锥组成的球形、半弧形或者平板型的阵列结构。小孔径实体角锥的制造难度较低,成熟的商用产品即可满足需求。

## 1.2 发展趋势

月球激光测距的精度直接决定引力物理参数的检验精度,单光子对应的测距精度已从最初的几分米提升到现在的厘米级。若将测距精度提升至毫米级,所有引力物理参数的检验精度将提高1个数量级<sup>[1, 13, 16-17]</sup>,这表明月球激光测距精度的提高将给引力物理的研究带来巨大的益处。然而,当前地面激光测距系统相关

技术的进步所带来的测距精度提高已达极限,月面现有激光角反射器的两大问题限制了月球激光测距的继续发展:

1) 月面上现有的5个角反射器经过近半个世纪的使用,月尘的积累降低了其光学面的透过率;反复的高低温循环也导致了角反射器材料光学性能的退化。根据相关研究的报道, Apollo系列的反射性能已经降低了10倍,而Lunakhod系列的退化则更加严重<sup>[18]</sup>。Apollo 15因反射面积远大于其它几个角反射器,而提供了超过70%的月球激光测距数据;其它反射器因性能退化且反射面积小,得到的测距数据逐年减少<sup>[19]</sup>。

2) 受限于20世纪60年代的角锥生产水平,月球表面现有反射器采用多个小孔径角锥组成的阵列结构,每个角锥都是一个独立的反射中心。月球轨道的扰动,使得地球中心位置相对月球有纬向±8.2°和经向±6.9°的天平动。如图2所示,月球天平动使入射的测距激光倾斜于角反射器所在平面,平面前部和后部的角锥之间有几个厘米的距离差,使得反射回的激光脉冲在时间上产生展宽,引起多达几个厘米的测距随机误差<sup>[19]</sup>。根据美国阿帕奇点(Apache Point)月球激光测距系统的误差分析,主要的随机误差源于月面的角反射器<sup>[20]</sup>。因此,现有角反射器的阵列结构已成为月球激光测距精度进入毫米级的最大瓶颈。

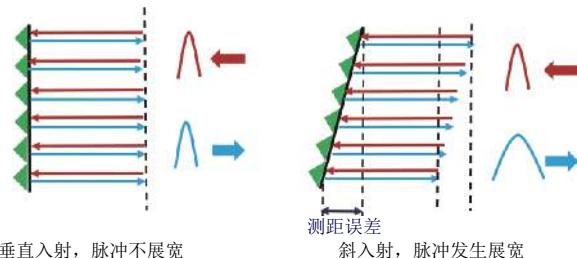


图2 阵列式角反射器导致激光脉冲展宽  
Fig. 2 Broadening laser pulse caused by corner cube retroreflector with array structure

为了解决月面角反射器性能退化,同时实现毫米级精度的月球激光测距,设计新型的激光角反射器替换原有角反射器成为最好的选择。新一代的月球激光角反射器必须采用单体的角锥反射镜结构(仅有唯一的反射中心),以消除月球天平动带来的测距随机误差。为了使单体角反射器的性能接近或等效于月面的角反射器阵列,需要增大孔径,同时减小反射光发散角<sup>[19, 21-22]</sup>。根据激光测距方程,测距回波光子数目与距离的4次方成反比;地月平均距离约为38万km,这要求角反射器的发散角需要被压制至接近衍射极限的水平,相应的二面角的直角精度需要达到亚角秒。根据

Ostubo等<sup>[23]</sup>的模拟，孔径100 mm的角反射器在二面角精度优于0.3"时，最优反射性能可达Apollo 11的15%~20%；孔径200 mm的角反射器在二面角精度优于0.4"时，最优反射性能可达Apollo 11的2.7倍。

## 2 新型单体角反射器设计

### 2.1 激光反射镜选型和参数

单体的大孔径角反射器有实心和空心角锥两种设计方案，两者在超过100 mm孔径下实现亚角秒的二面角精度都具有一定难度。对大孔径实体角反射器来说，限制是大体积的光学材料的均匀性。经过实体角锥内部的光路会产生弯折和色散，使光程发生变化，导致反射光发散角发生变化。对空心角反射器来说，由于光线不经过介质内部，不受材料均匀性的影响，制造难度仅在于3片玻璃的高精度调装和粘结。此外，空心角反射器的孔径是相同质量的实体反射器孔径的1.6倍（假设空心角反射器镜片厚度为15 mm）。若解决高精度的调装难题，空心角反射器将是实现新一代月球激光测距的更好选择。

美国和意大利的科学家在2011年联合提出21世纪地月反射器计划，采用孔径100 mm的实体角锥反射镜来替代Apollo计划中的38 mm角锥阵列。他们对反射器的光学性能、热性能和机械性能进行了模拟和分析，提出二面角精度为0.2"，反射性能达到Apollo 11的25%设计方案<sup>[21, 24]</sup>。Preston和Merkowitz<sup>[25-26]</sup>曾用两种方法研制孔径40 mm的空心角反射器。其中，环氧树脂粘接时在固化过程中容易产生形变；碱性催化粘结的空心角反射器调装的精度不够，比月球激光测距的需求差了近1个数量级。Neubert等<sup>[27]</sup>曾研制200 mm孔径的空心角反射器，由于环氧树脂胶水和固定夹具的形变，3个二面角精度分别为0.9"、4.31"和3.79"，离目标精度差1个数量级。

在卫星/月球激光测距中，合作目标和测距台站之间有相对运动，因此存在光行差效应。光行差使经角反射器反射后回到地面的光斑中心位置偏离台站，可以用下面的公式表达光行差效应

$$\alpha = \left( \frac{2}{c} \right) v \sin \varphi \quad (1)$$

其中： $c$ 为光速； $\alpha$ 为光行差； $v$ 为角反射器和台站的相对速度； $\varphi$ 为测距激光方向和角反射器之间台站相对速度矢量的夹角。根据Otsubo等的计算，月球激光测距中的地面和测距台站之间的光行差为0.7"~1.4"<sup>[23]</sup>，台站处于不同的纬度时，光行差的大小略有不同。由于地月平均距离达到38万km，因此激光在经过角反射

器反射，再回到台站时，光斑在地面的能量分布满足夫琅和费远场衍射条件。求解下面的基尔霍夫衍射方程，就可以得到光斑的能量分布

$$U(P_2) = \frac{\cos \varphi}{j\lambda R_0} \iint U(P_1) e^{ikr} ds \quad (2)$$

其中： $U(P_2)$ 为衍射后光场的复振幅； $U(P_1)$ 为角反射器出射波面的复振幅； $R_0$ 为角反射器的轨道高度； $\varphi$ 为测距激光对角反射器的入射角； $k$ 为波数。计算远场衍射光斑，利用光行差区域内（0.7"~1.4"）的平均能量，来评估角反射器的反射性能。采用170 mm孔径单体空心角锥的设计方案，如表1所示，计算结果表明二面角精度在0.1"~0.6"时，反射光强度都是可以接受的，为月面当前Apollo 11阵列的28.7%~87.0%。其中最优的二面角精度为0.3"~0.4"，此时衍射光斑亮条纹区域恰好于0.7"~1.4"的月球光行差区域重合，这与文献[23]中的分析结果一致。当二面角精度超过0.6"时，反射光的强度迅速下降，表明地面台站偏离了反射光斑能量集中的位置，几乎不能收到测距信号。因此，所研制的170 mm孔径空心角反射器的各个二面角精度需等于或优于0.6"。

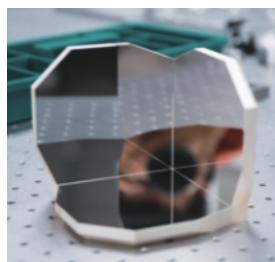
表1 不同二面角精度的170 mm孔径空心角反射器的反射光强度，光强值归一化至38 mm孔径理想实体角锥。所有量值计算光行差区域内（0.7"~1.4"）的平均值

Table 1 Return signal intensity for a 170-mm hollow CCR with varying dihedral angle offsets. The values are normalized to the ideal 38-mm aperture solid CCR. The intensity is the average value between 0.7 and 1.4 arcsec at far field

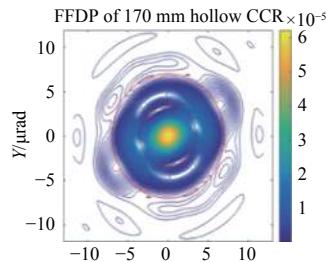
二面角精度/ ("")	反射光相对强度
0.1	28.7
0.2	62.2
0.3	87.0
0.4	85.8
0.5	62.0
0.6	33.1
0.7	13.1
0.8	4.9

目前，已经成功研制了170 mm孔径的空心角锥（如图3），具体参数如表2所示。3个二面角精度分别达到0.10"，0.30"和0.24"（如图4所示），可以满足月球激光测距的要求<sup>[28-29]</sup>。二面角精度的测量采用美国ZYGO公司生产的6英寸口径的菲索型激光干涉仪。仪器的角度测量分辨率达到0.01"；经过多次测量验证，测量重复性优于0.02"；测量精度优于0.04"。空心反射镜采用碱性催化粘结的方法制备<sup>[30-32]</sup>。根据模拟计

算,其反射光强度相当于理想Apollo 11角反射器阵列的68.5%。每片镜片的厚度为15 mm,总质量为1.4 kg,所用玻璃材料为康宁公司的ULE 7972标准级玻璃。针对测距所用532 nm或者1 064 nm波长的激光,各反射面镀高反射率保护银膜,各个面的反射率均超过97%。



(a) 单体空心角反射器



(b) 模拟远场衍射图案

图3 孔径170 mm的单体空心角反射器和模拟的远场衍射图案

Fig. 3 Hollow corner cube retroreflector with 170 mm aperture and simulated far field diffraction pattern

表2 空心角反射器的主要参数

Table 2 Key parameters for hollow corner cube retroflector

项目	参数
镜片尺寸(底面)	135 mm × 135 mm × 15 mm
镜片尺寸(侧面)	120 mm × 120 mm × 15 mm
面型	优于 $\lambda/10$
有效孔径	170 mm
重量	1.4 kg
二面角精度	0.10", 0.30", 0.24"
玻璃材料	康宁ULE 7972标准级
镀膜	保护银
粘接方式	碱性催化粘结

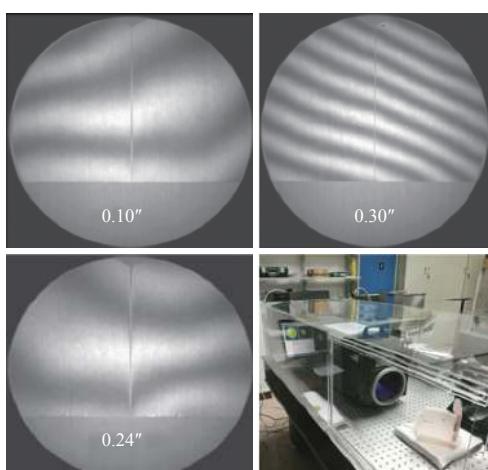


图4 空心角反射器3个二面角测量的干涉条纹以及测量方式图

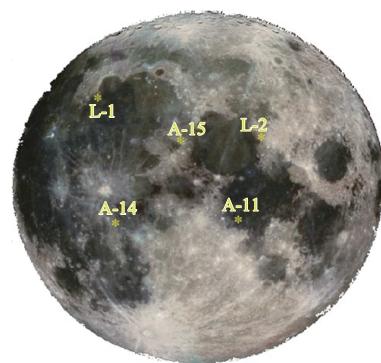
Fig. 4 Measured interferometric fringe and measuring method for three dihedral angles of hollow CCR

根据初步的设计,激光角反射器将由此空心角锥、外部保护罩以及指向调节和锁定机构组成。外部

保护罩主要提供与着陆器或者月面固定装置的连接口,降低镜体所处环境的温度梯度,以及为空心角锥提供支撑和减振作用。

## 2.2 安装和指向调节方式

月面5个激光角反射器阵列的位置如图5所示,Apollo 11和Apollo 14角反射器位于月球赤道附近的低纬度地区,其余3个角反射器位于月球北半球的中纬度地区。因此,若在月球的南半球或者北半球的极区进行软着陆,并且布置新的激光角反射器,将可弥补现有角反射器在分布区域上的空白,新获得的测距数据有望产生新的科学成果。

图5 月面现有激光角反射器的位置<sup>[19]</sup>Fig. 5 The locations of current lunar CCR arrays<sup>[19]</sup>

美国Apollo系列角反射器由宇航员带上月面,通过钻孔机在月壤上钻孔固定,再手动调节角反射器阵列前表面的法向指向地球。由于月球几乎没有大气,月昼和月夜的最大温度差达到300 K,热胀冷缩效应造成表面月壤的位置起伏可达500 μm。根据Nagihara等<sup>[33]</sup>的估算,月表50 cm深度以下的月壤温度起伏将骤降至1 K。为使月球激光测距的精度达到毫米甚至亚毫米级,需要尽可能抑制角反射器本身的位置起伏,因此月面打孔的深度至少需要超过50 cm。钻孔机可以钻至月面以下3 m深的位置,可以满足需求,但是功率高达450 W且重量较大,对于非载人登月来说代价过高,因此该方案难以被采用<sup>[34]</sup>。前苏联的Lunakhod系列角反射器安装在月球车伸出的臂上,通过月球车来调节角反射器指向地球。由于角反射器离月面有一定的距离,月球车在月昼和月夜剧烈的温度变化下发生热胀冷缩,会使角反射器的位置产生随机误差。

因此,综合考虑美国和前苏联已有的安置方案,提出的角反射器的月面安置方案如下:中国的月球探测器分为着陆器和巡视器(月球车)<sup>[35-36]</sup>,因此可考虑将新的角反射器直接安装在着陆器上,并由着陆器调

角反射器指向地球。着陆器在着陆月球之后优先完成其它任务，待其它任务结束之后，由着陆器内部的姿态测量敏感器搜索地球的方位，并调节角反射器指向对准地球。由于月球天平动在各个方向上均不超过 $8^{\circ}$ <sup>[19]</sup>，要求角反射器反射截面法向对准地球的精度为 $5^{\circ}$ 以内。角反射器对各个方向的入射光都可以沿原方向反射回，因此斜入射时只会影响其有效反射截面积。经过计算和分析，小于 $8^{\circ}$ 的倾斜入射对反射截面积的损失很小<sup>[37]</sup>。

### 3 环境试验验证

#### 3.1 热真空间验

激光角反射器在月面将直接经受空间低温背景辐照以及各种外热流条件，角反射器自身对红外辐照的发射率较高，空间热环境更容易对其产生影响。月球表面热环境较为特殊，月球几乎没有大气层和大气活动，表面直接通过热辐射和宇宙空间交换热量。月球的昼夜温差很大，还将重点研究月面红外热流模拟方法、月壤的反射热流等效模拟方法、角反射器的极端热流量级和分布等。

根据温度场分析，可以确定角反射器的工作温度范围和温度场分布规律，对角反射器的热设计和材料工艺的选取进行指导和优化，并以此开展热环境试验验证，从而检验激光角反射器热设计的合理性，验证其在极端工作温度下的性能。因此，激光角反射器的热环境试验应包含热平衡试验和热真空间验两部分。在经过极端温度环境的考验之后，将重新测量角反射器的二面角，以确认其是否产生热变形，继而确认变形量是否可以被接受。角反射器在月面经历的温度范围约为 $(-170\sim+130)^{\circ}\text{C}$ 。

#### 3.2 力学试验

激光角反射器在总装、运输、发射以及月面着陆的过程中将经历复杂的力学环境，其中尤以发射阶段的力学环境最为严酷。卫星发射过程从起飞开始，直到在预定轨道上与运载火箭分离。在此期间，运载火箭起飞会引起严重的动态环境和噪声环境，级间分离会产生瞬态载荷，稳态加速飞行过程会产生过载，星箭分离时会产生瞬态载荷等。这些都会形成特性和量级不同的力学环境，因此，激光角反射器需要在地面经历类似力学环境的试验，来验证其在经历火箭发射环境后的可靠性。

针对激光角反射器在发射过程中可能经历的力学环境，需要进行加速度试验、振动试验和冲击试验验证。每项试验中，均需对角反射器的3个方向分别进

行。相应的力学试验条件参考继承型号的经验，加速度试验采用线性加速度过载，可利用离心机来实现；振动试验分为正弦振动（模拟级间分离）和随机振动（火箭在大气层内的随机振动），利用振动台实现；冲击试验采用冲击响应谱（星箭分离）来模拟，测试设备主要由谐振板式冲击模拟装置、控制系统、测量系统和数据处理系统组成。

对激光角反射器进行了初步的力学试验验证，证明了其结构和工艺的可靠性。后期，需要在试验的基础上，根据内部各个位置的力学响应，对结构进行进一步优化，避免风险。

#### 3.3 空间环境

由于没有大气的存在，角反射器将在月面受到强烈的紫外辐照和带电粒子辐照的考验，辐照对角反射器材料以及镀膜的影响需要通过地面试验来检验。辐照试验对角反射器的材料存在潜在的不可逆破坏。因此，需要准备一系列采用与角反射器相同的玻璃材料的样品镜片，表面采用相同的工艺镀保护银反射膜。试验之前，分别测量反射镜的反射率曲线，特别是在 $532\text{ nm}$ 和 $1\ 064\text{ nm}$ 两个波长附近的反射率。经过一定剂量的辐照试验之后，先观察反射膜是否有脱落现象，然后重新测量其反射率。对比试验前后的反射率，可检验镜面的反射率在经历空间辐照环境之后，是否会产生退化。

目前，已对镀银反射膜进行了带电粒子辐照实验，辐照源采用 $\text{Co}^{60}$ ，剂量率为 $0.18\text{ Mrad/h}$ ，试验时间为连续 $56\text{ h}$ ，总的辐照剂量为 $10\text{ Mrad}$ 。**表3**给出了样品在 $532\text{ nm}$ 附近（ $520\text{ nm}$ 和 $540\text{ nm}$ 两个波长）的试验前后反射率对比，可以发现反射率并没有显著的衰减情况。Durrie等<sup>[21]</sup>曾利用 $\text{Co}^{60}$ 辐照源对美国-意大利21世纪月球激光测距角反射器（LLRRA-21）进行辐照实验，剂量率为 $0.063\text{ Mrad/h}$ ，试验时间为连续 $98\text{ h}$ ，未发现任何可见的反射膜损伤。同样，希望在接下来的工作中验证介质反射膜对空间环境的适应性，以求得到最佳选择。

表3 带电粒子辐照实验前后镀银反射膜反射率测试结果

Table 3 Comparison of the reflectivity for protected silver coating before and after the radiation test

样品	测试前		测试后	
	520 nm	540 nm	520 nm	540 nm
1	0.972	0.976	0.973	0.977
2	0.969	0.973	0.967	0.972
3	0.974	0.975	0.973	0.977
4	0.974	0.976	0.973	0.977

## 4 结束语

月球激光测距是研究引力物理和地月系统的重要试验，目前已积累了近50年的数据。新的角反射器能将目前的测距精度提升1个数量级，对于一系列引力物理参数的检验精度也将提升1个数量级，具有重要的科学意义和价值。目前，中国已有中山大学和中国科学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。因此，同步研究新型的月球激光测距角反射器，并借助中国后续的月球探测计划安置于月球表面，将有望使中国在该领域的研究工作达到国际先进水平。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] WILLIAMS J, TURYSHEV S, BOGGS D. Lunar laser ranging tests of the equivalence principle[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, 29: 184004.
- [5] JÜRGEN M, JAMES G W, SLAVA G, et al. Potential capabilities of lunar laser ranging for geodesy and relativity dynamic planet[M]. [S.I.]: International Association of Geodesy Symposia, 2006.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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, L5: 522.
- [9] WILLIAMS J, TURYSHEV S, BOGGS D. Progress in lunar laser ranging tests of relativistic gravity[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93: 261101.
- [10] WILLIAMS J, BOGGS D, YODER C, et al. Lunar rotational dissipation in solid body and molten core[J]. *Journal of Geophysics Research: Planets*, 2001, 106: 27933-68.
- [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 Geophysics Research: Planets*, 2004, 109: E09007.
- [12] ALLEY C, BENDER P, CURRIE D, et al. Laser ranging retroreflector: 19710021489[R]. USA: NASA Special Publication, 1971.
- [13] MURPHY T. Lunar laser ranging: the millimeter challenge[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2013, 76: 076901.
- [14] LI S, TANG B, ZHOU H. Calculation on diffraction aperture of cube corner retroreflector[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(11): 833-836.
- [15] ZHANG Z, ZHANG H, CHEN W, et al. Design and performances of laser retro-reflector arrays for Beidou navigation satellites and SLR observations[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54: 811-817.
- [16] DICKEY J, BENDER P, FALLER J, et al. Lunar laser ranging: a continuing legacy of the Apollo program[J]. *Science*, 1994, 265: 482-490.
- [17] 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(中英文), 2017, 4(2): 130-137.
- [18] 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.
- [19] MURPHY T, ADELBERGER E, BATTAT J, et al. Long-term degradation of optical devices on the Moon[J]. *Icarus*, 2010, 208: 31-35.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] HE Y, LIU Q, DUAN H, et al. A 170 mm hollow corner cube retro-reflector on Chang'e 4 lunar relay satellite [C]//Proceedings of the 20th International Workshop on Laser Ranging. Potsdam, Germany: [s.n.], 2016.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] PRESTON A, MERKOWITZ S. Next-generation hollow retroreflectors for lunar laser ranging[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(36): 8676-8684.
- [27] NEUBERT R, LUDWIG G, HAMDORF A, et al. Testing a 20 cm diameter open reflector[C]//Proceedings of International Technical Laser Workshop. Frascati, Italy: [s.n.], 2012.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] ELLIFFE E, BOGENSTAHL J, DESHPANDE A, et al. Hydroxide-

- catalysis bonding for stable optical systems for space[J]. *Classical Quantum Gravity*, 2005, 22: 257-267.
- [32] GWO D, WANG S, BOWER K, et al. The gravity probe-b star-tracking telescope[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 32(7): 1401-1405.
- [33] NAGIHARA S, TAYLOR P, WILLIAMS D, et al. Long-Term warming of surface and subsurface temperatures observed at Apollo15 and 17 sites: implications for future lunar geophysical missions ground-based geophysics on the Moon[C]//LPI Contribution No. 1530, p. 3008Ground-Based Geophysics on the Moon. Arizona, USA: [s.n.], 2010.
- [34] ZACNY K, CURRIE D, PAULSEN G, et al. Development and testing of the pneumatic lunar drill for the emplacement of the corner cube reflector on the Moon[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 71: 131-141.
- [35] 吴伟仁, 于登云.“嫦娥3号”月球软着陆工程中的关键技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2014, 1(2): 105-109.  
WU W R, YU D Y. Key technologies in the Chang'e-3 soft-landing project[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(2): 105-109.
- [36] 吴伟仁, 周建亮, 王保丰, 等. 嫦娥三号“玉兔号”巡视器遥操作中的关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(4): 425-440.  
WU W R, ZHOU J L, WANG B F, et al. Key technologies in the teleoperation of Chang'E-3 “Jade Rabbit” rover[J]. *Science China: Information Sciences*, 2014, 44(4): 425-440.
- [37] 周辉, 李松, 郑国兴, 等. 卫星角反射器有效衍射区域的研究[J]. 光子学报, 2009, 38(8): 1920-1925.  
ZHOU H, LI S, ZHENG G, et al. Effective diffraction region for satellite retroreflector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(8): 1920-1925.
- 作者简介:**
- 何芸(1987-), 男, 副研究员, 主要研究方向: 激光测距。  
通讯地址: 广东省珠海市中山大学行政楼7楼(519082)  
E-mail: heyun@whu.edu.cn
- 胡泽主(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 激光测距。  
通讯地址: 广东省珠海市中山大学行政楼7楼(519082)  
E-mail: huzzh@mail2.sysu.edu.cn
- 黎明(1983-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 小卫星总体设计。  
通讯地址: 北京市航天城航天东方红卫星有限公司(100094)  
E-mail: dawn75918@126.com
- 刘祺(1981-), 男, 副教授, 主要研究方向: 精密扭秤。本文通讯作者。  
通讯地址: 广东省珠海市中山大学行政楼7楼(519082)  
E-mail: liuq239@mail.sysu.edu.cn
- 叶贤基(1965-), 男, 教授, 主要研究方向: 精密测量物理。  
通讯地址: 广东省珠海市中山大学行政楼8楼(519082)  
E-mail: yexianji@mail.sysu.edu.cn

## Schematic Design of New Generation of Lunar Corner Cube Retroreflector with Single Aperture

HE Yun<sup>1</sup>, HU Zezhu<sup>1</sup>, LI Ming<sup>2</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, YEH Hsienchi<sup>1</sup>

(1. TianQin Research Center for Gravitational Physics & School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China; 2. DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract:** A corner cube retroreflector (CCR) with single large aperture for the new generation of Lunar Laser Ranging (LLR) is designed. On the basis of analyzing the current research progress and development trend at home and abroad, the overall design scheme of the single large aperture CCR is introduced, including the design of retroreflector, the scheme of placement on lunar surface, and the environmental testing scheme. It is verified that the 170 mm hollow CCR can realize 68.5% reflecting intensity of ideal Apollo 11 CCR array at 532 nm. This study is anticipated to promote the precision of LLR for a single photon received to millimeter level.

**Keywords:** lunar laser ranging; laser retroreflector; hydroxide-catalysis bonding; environmental test

### Highlights:

- The single-aperture structure of CCR can completely eliminate the ranging error caused by lunar libration.
- The hollow CCR is fabricated using hydroxide-catalysis bonding technology.
- The reflecting intensity is expected to reach the similar level as Apollo 11 CCR array.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]