

文章编号: 1000-8349(2012)03-378-16

月球激光测距观测与研究进展

华 阳^{1,2}, 黄乘利^{1,3}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院 行星科学实验室, 上海 200030)

摘要: 概述了全球激光测月LLR(Lunar Laser Ranging)工作的发展现状, 包括地面台站与月面反射器情况、观测资料与数据格式, 并对全球几个主要的激光测月系统进行了对比分析; 重点介绍了Apache Point的LLR站有关技术和观测情况, 对影响观测结果精度的各因素做了分析。总结了近40年来通过激光测月技术获得的研究成果, 包括对引力理论的检验、测定台站和反射器的坐标、地球自转参数、星历表、月球物理参数、内部结构与天平动以及月球潮汐等方面的成果, 并介绍了我国在相关领域开展工作的情况, 最后对测月工作进行了展望。

关键词: 月球激光测距; 月球物理; APOLLO

中图分类号: P228.5 **文献标识码:** A

1 引言

月球激光测距(LLR)和人卫激光测距(SLR)作为最早出现的空间天文和大地测量技术, 至今已经走过了40多年, 其资料对天文地球动力学、地月科学、月球物理学和引力理论等诸多学科的研究有着重要的价值。近年来, 随着与LLR观测有关的各种技术的进步, 测量精度在逐步提高。特别是美国Apache Point天文台的LLR站相对于其他老站, 测量精度提高了约1个数量级, 使得LLR又面临着一个发展的机遇期。另一方面, 进入21世纪以来, 人类探月活动再次升温, 特别是我国开展了系列嫦娥探月计划, 对月球的研究再次成为热点。随着我国对月球探测系列活动步入高潮, 我国开展LLR观测与资料应用研究的工作也日渐迫切; 因此, 我们现在有必要回顾LLR技术的发展历程, 跟踪对月球的地面观测技术研发与科学研究活动, 总结LLR给我们带来的主要科学成果。

收稿日期: 2012-04-20; 修回日期: 2012-05-20

资助项目: 国家自然科学基金(11073044, 11133004); 上海市科委(12DZ2273300)

2 LLR观测情况

2.1 月面反射器

1969年7月21日美国Apollo登月成功, 激光后向反射器Apollo 11号被宇航员放置到预定的月面位置上。不久之后, 美国Lick天文台和McDonald天文台就成功观测到来自Apollo 11号反射器的激光回波信号, 自此开始了月球激光测距工作。随后, 美国又在月面上放置了Apollo 14号和Apollo 15号激光反射器; 前苏联先后发射了Luna17和Luna21月球登陆车, 相继把Lunakhod 1号和Lunakhod 2号激光后向反射器放置到月面上。至今, 月面上一共有5个可供进行激光测月的激光后向反射器, 它们在月面上的安放位置如图1所示, 反射器参数如表1所示。

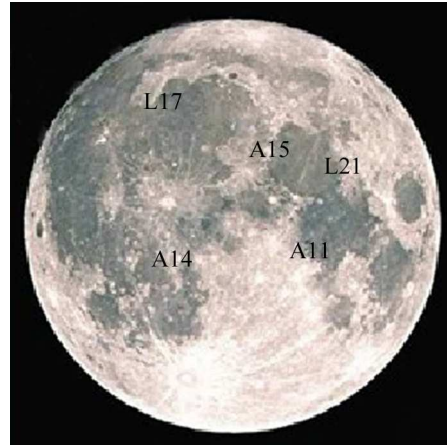


图1 月面激光后向反射器位置示意图^[1]

表1 月面激光后向反射器主要参数

Z	T/(y-m-d)	M/kg	A/cm ²	D/km	L/(°)	W/(°)
Apollo 11	1969-07-21	20	1 134	1 735.4725	23.472 93	0.673 37
Lunakhod1	1970-11-10	3.5	734	1 735.471 6	-36.994 90	38.325 07
Apollo 14	1971-02-05	20	1 134	1 736.335 8	-17.478 80	3.644 21
Apollo 15	1971-02-05	20	3 402	1 735.481 1	3.607 03	26.155 04
Lunakhod2	1973-01-15	3.5	734	1 734.638 1	30.909 37	25.850 99

* 其中, Z代表反射器名称, T代表反射器放置日期, M代表反射器的质量, A代表反射器有效反射面积, D代表月心距, L代表月面经度, W代表月面纬度。

月面上5个激光反射器所获得的观测数据数量差异很大, 其中Apollo 15号反射器所占的观测数据已达到了77%以上。Lunakhod 1号反射器在放置初期曾获得回波信号, 此后未收到任何回波信号, 直到2010年4月Apache Point天文台采用3.5 m激光测月系统重新获得了该反射器的回波信号。截止到2012年3月底, 总共获得了近 1.98×10^4 个标准点数据, 各月面反射器获得的观测数据量所占比例如表2所示。

由于早期技术的限制及各种因素, 美国和前苏联在月面上安装的5个后向反射器目前只有3个可有效使用; 尽管其他2个最近成功地收到了回波, 但依然很弱。随着更多的台站加入并发展新技术, 不排除会重新利用所有的反射器, 甚至在月面上安装新的反射器。

2.2 地面台站

目前, 国际上能够进行常规激光测月工作的有美国McDonald天文台和法国的Grasse测月站。McDonald天文台在Apollo 11号反射器放置不久后就成功完成了激光测月的实验性工

表2 截止到2012年3月底各月面反射器观测数据量比例分布

反射器名称	反射器简称	ILRS编号	数据所占比例/%
Apollo 11	A11	0	10.03
Lunakhod1	L1	1	0.15
Apollo 14	A14	2	9.94
Apollo 15	A15	3	77.20
Lunakhod2	L2	4	2.67

作, 并一直发展完善至今。1983年, McDonald天文台用0.76 m口径望远镜激光测月系统取代了旧的2.7 m望远镜系统, 兼顾SLR和LLR观测。1988年, McDonald天文台将新系统移至Mt Fowlkes以改善大气视宁度, 并使用至今。美国夏威夷的Haleakala天文台在1984年到1990年期间也开展了LLR工作。Grasse测月站于1990年建成并投入到激光测月工作中。21世纪初, 意大利在Matera新建了一个测月站, 成功地实现了激光测月并取得了一些数据。2005年底, 美国的Apache Point天文台提出了APOLLO(Apache Point Observatory Lunar Laser-ranging Operation)计划, 采用3.5 m口径望远镜激光测月系统, 至今已获得上千个标准点数据(2.5节有详细介绍)。除此之外, 开展激光测月工作的台站还有澳大利亚的Orroral观测站和德国的Wettzell观测站^[1]。各台站的分布如图2所示, 各台站的激光测月系统参数如表3所示。其中, Lat 代表纬度, Lon 代表经度, E 代表海拔, D 代表望远镜的口径, M 代表脉冲能量, W 代表脉冲宽度, R 代表重复率。由图可知, 全球的测月台站的分布并不均匀, 大部分台站位于北半球。各个激光测月站所获得的观测数据量分布如表4所示。

图2 各激光测月站分布图^[2]

2.3 LLR数据格式

随着激光测距技术的发展, LLR数据格式也经历了一个不断发展的过程。在激光测月早期, 原始的数据格式记录的信息量较少, 记录的观测往返时延精度在100 ps量级。随着观测精度的提高, 为了适应毫米级激光测月的要求, LLR数据格式也相应发生了改变, 目前所用

表 3 各激光测月站的技术参数^[2]

Observatory	ID	Lat/(°)	Lon/(°)	E/m	Nation	D/m	M/J	W/ps	R/Hz
McDonald	7080	30.680 2N	255.984 8E	2 006.221 0	USA	0.76	1.5	200	10
Grasse	7845	43.754 6N	6.921 6E	1 323.1	France	1.5	0.13	250	10
APOLLO	7045	32.780 361N	105.820 417W	2788	USA	3.5	0.115	90	20
Haleakala	7119	20.706 486N	203.743 084E	3 056.277	USA	2	0.3~1.5	200	3
Wettzell	8834	49.144 4N	12.878 0E	665	Germany	0.75	0.36	80	10
Orroral	—	35.628 6S	148.955 8E	—	Australia	1.5	3	250	10
Matera	7941	40.648 6N	16.704 6 E	536.9	Italy	1.5	0.2	50	10

表 4 截止到2012年3月底各激光测月站获得的观测数据量分布

LLR站	Grasse	McDonald	APOLLO	Matera	Haleakala
数据所占比例/%	50.26	40.74	4.86	0.16	3.97

的LLR数据格式记录的观测往返时延的截断精度为0.1 ps。

LLR数据常被整理成标准点数据(Normal Point Data),也就是在10~20 min时间跨度内多个观测点的平均结果。

LLR数据记录的必需信息有发射时间(UTC)、观测往返时延、月面反射器和地面台站的标识符、本地大气压强、温度、湿度和激光波长,非必需信息有标准点中的回波光光子数、不确定性(精确度)、信噪比、标准点的持续时间和数据质量等级等。

目前常用的LLR标准点数据格式主要有三种:MINI、CSTG和CRD^[3]。

MINI数据格式在20世纪80年代和90年代就被McDonald天文台、Haleakala天文台和Grasse观测站所使用,目前,Apache Point天文台的标准点数据记录仍然采用这种数据格式^[4]。MINI数据格式如图3所示。由于这种格式记录的信息量较少,在一定程度上不能满足现代LLR观测数据记录的要求,现在,国际激光测距服务组织(ILRS)已经停止使用这种数据格式。预计Apache Point天文台在不久之后也将使用ILRS规定的最新数据格式,并将数据放在ILRS网站上进行存档。

```

512006 4 7 62625000000026494219464224370610 43 720 37B 72160 833 5320A 263A
512006 4 7 63220000000026501875673327370610 42 806 15B 72156 1233 5320A 518A
512006 4 8 33540000000026473633570397370610 42 548 38B 72792 6625 5320A 259A
512006 4 8 34015000000026474405172343370610 44 553 35B 72784 6026 5320A 310A
512006 6 4 23730000000026491370926771370610 56 395 45B 73106 16728 5320A 503A
512006 6 4 24550000000026495855245572370610 35 483 44B 73111 16628 5320A 350A

```

图 3 MINI数据格式

CSTG数据格式在1990年被推荐使用,1999年被ILRS正式采纳,作为SLR和LLR的观测数据记录格式,在1997年和2004年先后进行了版本修订。CSTG每个标准点数据记录以‘99999’的标识符开头,接着是头信息和数据记录信息。头信息主要包含台站和反射器标识符、发射时间和激光波长的信息,数据记录包含往返时延、回波光光子数、环境参数等信息。CSTG数据格式如图4所示。

```

99999
0000103111897080241953200000096700000001722467400931332
092251319904427624110475000009308000296603200050250048
99999
0000103111917080241953200000093700000001472467404704272
054640083343438389897041000045907987300702300050240079
066351069793438089399534000048107987299102400120240000

```

图4 CSTG数据格式

CRD格式(Consolidated Laser Ranging Date Format)是一种具有灵活性和可扩展性的数据格式,它包括头信息、配置信息和数据记录三个部分。头信息包含有关台站、反射器和发射时间的信息,配置信息包含数据的系统配置方面的信息,数据记录包含发射与接收时间等信息。目前在ILRS网站上存档的CRD格式的LLR数据数量较小。CRD格式如图5所示。

```

h1 CRD 1 2010 10 14 1
h2 MDOL 7080 24 19 4
h3 apollo15 103 103 0 0 2
h4 1 2010 10 14 1 9 51 2010 10 14 1 41 35 0 0 0 0 1 0 2 0
c0 0 532.000 std m11 ham mt1
c1 0 m11 Nd-Yag 1064.00 10.00 -1.00 200.0 -1.00 1
c2 0 ham ham 532.000 -1.00 3800.0 0.0 unknown -1.0 6.00 -1.0 10.0 none
c3 0 mt1 Symmetricom_Cs_4310 Symmetricom_Cs_4310 MLRS_CMOS_TMRB_TD811 na 0.0
60 std 7 4
40 4159.0000000 0 std 426 281 -1.000 726.0 0.0 153.2 0.681 0.258 -28.0 3 3 0
20 5219.000 808.37 285.46 64. 0
11 5597.900786529804 2.588307664018 std 2 738.0 4 237.1 0.650 -1.462 0.0 99.90 0
50 std 237.1 -1.000 -1.000 -1.0 1
h8
H9

```

图5 CRD 数据格式

以上记录格式的详细信息可参见ILRS官方网站^[2]。

2.4 观测精度

随着激光探测技术的发展,LLR观测数据的精度也在逐步提高。在激光测月刚开始阶段,标准点(Normal Points)距离精度约为30 cm(即测时精度约1 ns)。由于McDonald的2.7 m激光测月系统计时装置的改进,在20世纪70年代中期,精度提高到15 cm;在20世纪80年代中期,McDonald采用新的0.76 m口径望远镜,并将测距精度提高至5 cm或更小。1990年Grasse测月站开展LLR工作,其标准点精度一直维持在2~3 cm之间。如今,McDonald和Grasse站的标准点精度已达到1~2 cm。2005年底,Apache Point天文台投入到LLR工作中,由于采用了更大口径的望远镜和更强的探测技术,观测精度提高至几毫米的量级。LLR发展以来,观测精度的变化如图6所示。目前LLR的单次测距精度约1~2 cm,标准点精度已可以达到2~3 mm。

在现代月球激光测距系统中,观测结果随机不确定性的主要来源已不再是系统组件误差的影响,而是月球激光后向反射器阵列的指向变化。理想情况下,月面反射器阵列指向地球的平均方向误差在1°以内;但由于月球天平动,实际上这个指向误差可能会达到7°左右,这

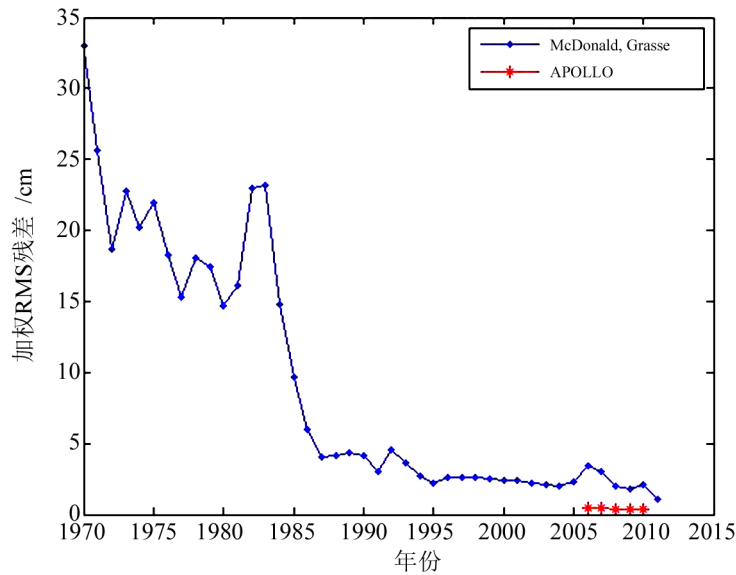


图6 LLR观测精度变化趋势图

就造成了地球和反射器阵列之间距离的均方根误差可达15~36 mm, 换算成台站与反射器间的激光往返时间, 为100~240 ps。

假设单个光子的测距不确定值为 σ , 一个标准点数据包含了 N 个回波光子, 则标准点的测距不确定值为 $\sigma' = \sigma/\sqrt{N}$ 。对于McDonald台站, 一个标准点大概持续15 min, 而1 min能收到大约1个回波光子, 由此可得, 仅仅因为反射器指向误差引起标准点的测距不确定值就可达4~9 mm。若要达到毫米级的测距精度, 即 $\sigma' = 1$ mm, 假设 $\sigma = 50$ mm, 则可以得到每个标准点数据要包含2500个回波光子, 这远远超出了McDonald、Grasse等LLR台站的激光探测能力。由此也可以看出, 制约月球激光测距精度提高的重要因素是地面台站接收到的从月面反射器返回的激光回波光子数太少。令人欣慰的是, APOLLO激光测月系统在激光光子探测能力方面有了很大的提高, 每发射一次激光脉冲, 平均回波光子数为0.25, 最高能达到0.5个以上的水平^[5]。APOLLO的激光重复率为10 Hz, 按此计算, 8 min就能接收到2500个回波光子数。正因为如此, APOLLO的测距精度较McDonald台站有了很大的提高。

2.5 APOLLO台站技术和观测情况

Apache Point天文台于2005年底开始了激光测月的工作, 并建立了自己的测月系统APOLLO, 其测距精度好于其他激光测月站, 已达到毫米级^[6]。下面对APOLLO测月系统作简要的介绍, 并与McDonald和Grasse测月系统进行比较分析。

Apache Point天文台位于美国新墨西哥州南部海拔为2800 m的地方, 其地理观测条件极好, 视宁度达到了1.05"。APOLLO使用了3.5 m口径的望远镜, 也是目前全球几个激光测月系统中望远镜口径最大的一个。相比于APOLLO激光测月系统, McDonald系统的望远镜口径为0.76 m, 视宁度约为4"; Grasse系统的望远镜口径为1.5 m, 视宁度为2.5"; APOLLO的

光子接收面积分别为McDonald的20倍和Grasse的5倍。

我们可以估算出每次激光脉冲所获得的回波光子数^[7]。假设测距系统每次激光脉冲的能量为 E_0 ，对于波长为532 nm的激光，每焦耳的光子数 $N = 2.7 \times 10^{18}$ ，发射和接收系统光路的透过率均为 γ ，则每次从地面测距系统发射出去的激光脉冲的光子数 $N_t = E_0 N \gamma$ 。设发射出去的激光光束发散角为 ϕ ，若激光以发散角 ϕ 均匀地投向相距为 R 的月面反射器上，则根据激光传输的几何路径计算，在月面上将形成光斑，面积为 $\pi \left(\frac{\phi}{2} R\right)^2$ ，而月面反射器的有效面积为 $n\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$ ，其中 n 为角反射器的个数(对于Apollo 11和Apollo 14反射器， $n = 100$ ；对于Apollo 15反射器， $n = 300$)， d 为单个角反射器的直径(对于Apollo反射器， $d = 3.8$ cm)，故月面反射器获得的光子数为 $E_0 N \gamma n \left(\frac{d}{\phi R}\right)^2$ 。激光光束到达月面反射器后，以发散角 Φ 反射回地面测站。同样由激光传输路径计算，则到达地球表面将形成光斑，而地面接收镜的有效接收面积为 $\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$ ，故到达地面测站的激光回波光子数为 $E_0 N \gamma n \left(\frac{d}{\phi R}\right)^2 \left(\frac{D}{\Phi R}\right)^2$ 。再考虑接收光路的透过率 γ ，窄带滤波器的透过率 f ，接收器件的量子效率 Q 的影响，则接收器件光敏面上产生的平均光电子数 N_r 为：

$$N_r = E_0 N \gamma^2 n f Q \left(\frac{d}{\phi R}\right)^2 \left(\frac{D}{\Phi R}\right)^2 \quad (1)$$

对于APOLLO系统， $E_0 = 115$ mJ， $\gamma = 0.4$ ， $f = 0.25$ ， $Q = 0.3$ ， $\phi = 1''$ ， $\Phi = 10''$ ， R 取平均地月距离 3.84×10^5 km， n 取Apollo 11的角反射器个数100，则可得 $N_r \approx 5$ 。即在理论情况下，对Apollo 11反射器，每发射一次激光脉冲能接收到5个回波光子。在实际中，还要考虑激光束的能量分布和大气湍流对激光传输的影响，其回波光子数会更少。

实际工作中，APOLLO每次脉冲所获得的平均回波光子数约为1/4，而对McDonald这个值为1/500，Grasse为1/100^[5]。由此可见，APOLLO系统的回波光子率明显好于其他测月站。

在上述讨论中，还没有考虑到背景噪声的影响。在满月甚至白天条件下，因为有很高的背景噪声的影响而难以获得较好的信号，对激光测距(尤其是LLR)工作是很大的挑战。APOLLO系统有很小的光子接收视野，大约为 $1.2''$ ^[8]，加上系统其他方面的改进，使得APOLLO在满月和白天条件下也可以开展测月工作，而其他台站如McDonald和Grasse测月站都还没有实现。

2010年4月，APOLLO获得了丢失已久的Lunakhod 1号反射器的回波信号。虽然得到的数据量很少，但已是很大的突破，也反映了该台站LLR的强大观测能力。

3 LLR科学研究

LLR技术精确测定激光脉冲从地面台站发射至月面反射器，再经反射回到地面台站的往返时间间隔，以获得地月间的距离信息。这些距离信息反映了地球、月球以及地月轨道的重

要信息, LLR对于研究地月系统的物理机制及其轨道提供了重要的技术手段。

LLR已经发展了40多年, 至今已经积累了近 2×10^4 个标准点数据。利用这些数据, 国内外已经开展了许多科学研究工作^[9-11]。通过LLR开展研究的科学问题大致可归纳为以下4个方面: (1)引力理论和广义相对论效应的检验, 等效原理的验证和引力常数的变化是早期国际上开展LLR工作的重要目标之一; (2)地球物理和大地测量, 地面台站的坐标及其运动(含板块运动)、世界时UT0/UT1、纬度的变化、岁差和主要章动项; (3)月球动力学和大地测量, 物理天平动、月面参考架、月球潮汐等, 是研究月球内部的结构与物理的重要手段和主要信息来源之一; (4)日月系统的潮汐, 等等。

3.1 万有引力常数变化和Nordtvedt参数

相对于VLBI观测的河外射电源, 月球是离地球最近的自然天体, 所处的引力场环境比较明确; 而相较于GPS星座或SLR卫星, 月球与地球之间的空间尺度很大, 月球的引力效应显著; 同时, 由于已存在较长时间尺度的观测, 而且观测精度也已从分米到厘米并改进到毫米级, LLR已成为精确测定相对论参数强有力的手段^[9]。事实上, 最初LLR技术提出的主要目的之一便是检测相对论理论。

万有引力常数 G 是随时间变化的, 可以用下式的线性变化方程近似描述:

$$G = G_0 \left(1 + \frac{\dot{G}}{G_0} \Delta t \right) . \quad (2)$$

其中, Δt 为当前时间与参考历元J2000的时间间隔, \dot{G}/G_0 是万有引力常数的线性变化量。Müller等人^[10]利用2008年以前的测月数据, 得到 $\dot{G}/G_0 = (-0.9 \pm 4.0) \times 10^{-13} \text{ a}^{-1}$ 。Hofmann^[11]利用从1970到2009年12月的LLR数据资料, 采用的分析模型中考虑了月核的影响, 计算出 $\dot{G}/G_0 = (-0.7 \pm 3.8) \times 10^{-13} \text{ a}^{-1}$ 。

地球和月球都有很大的引力自身质量, 因此, 它们可以用来检验关于太阳引力场的强等效原理^[12,13]。如果修正等效原理(Nordtvedt参数 $\eta \neq 0$), 地球和月球将以不同的加速度相对太阳运动, 这将导致月球轨道在沿太阳方向上有一小段位移。这可以通过在运动方程中采取不同的地月引力质量与惯性质量的比值(m_g/m_i)来处理, 或者通过分析地月间的距离沿太阳方向上的振幅变化 Δr_{EM} 来处理, 这个振幅与 η 有关。在过去的研究中, 只考虑距离 Δr_{EM} 的二阶项:

$$\Delta r_{EM} = A\eta \cos D . \quad (3)$$

其中, D 是地月间的距离矢量相对地日连线方向上的夹角, 振幅 A 由Nordtvedt的理论计算给出, 其值为12.8 m。如果只考虑现有的测月数据, 得出 $\eta = (2.1 \pm 5.3) \times 10^{-4}$; 如果考虑月核的影响, 则 $\eta = (-0.6 \pm 5.2) \times 10^{-4}$ ^[14]。当取不确定值 $\delta\eta = 5.2 \times 10^{-4}$ 时, 根据式(3), 得到 Δr_{EM} 的最大误差为7 mm, 而这在现代LLR资料分析中都可以检测出来。

3.2 测定台站及反射器坐标、EOP和星历表

LLR可以测定地面台站的地心坐标和台站间的基线长度^[14], 以及月面反射器的月心坐标。目前, 对地面测月站的坐标解算精度已达到厘米量级。为了削弱初值误差对结果的影响, 通常采用逐步迭代的方法^[15], 对地面测站而言, 有很好的收敛性, 经过一两次迭代就能收敛

到2 cm之内^[16]。地球板块的运动速度每年在数毫米至数厘米之间,测量两个测月站间的基线长度就可以检测出板块运动;但由于全球的LLR站很少,并且分布也不均匀,因而在对板块运动的研究中,LLR贡献不明显,而通常通过其他技术手段(如VLBI、GPS和SLR等)来实现。

由于早期技术的限制及各种因素,LLR能提供的月面后向反射器的位置精度(月心参考架下)一直不理想。例如反射器之间相对位置精度在分米级(水平方向)和厘米级(径向),但其绝对精度差于几km(水平)和100 m(径向)量级,而其他地区尤其是月球背面则差得更远,这与月球全球重力场模型和参考框架的不准确密切相关^[16]。由月面上4个后向反射器(不含L1)组成的月面参考架的精度目前在分米级^[17]。随着技术的发展,这个精度应该可以再提高一些。这些反射器的月心坐标可用于月面测绘网络的强约束控制点,也可以对月球轨道飞行器测高资料提供强约束^[18]。

极移和日长变化(LOD),与岁差、章动一起构成地球定向参数(EOP),它是实现天球参考架与地球参考架相互转换的参数,是地球动力学研究的重要课题。LLR能提供独立的UT0、UT1解算结果,这是SLR和GPS等不具有的能力,这在早期(20世纪80年代中期以前)发挥了重要作用。对测月资料采用事后残差分析的数学模式进行处理,可以解算得到EOP^[19-21]。由LLR解算得到UT1的精度为0.1~0.2 ms,极移的精度为2~3 cm^[1]。

激光测月技术的一个重要应用就是建立和完善地月系统的运动学模型,并建立高精度的月球历表。目前最新的行星历表有美国JPL的DE403、DE405、DE421等系列历表,俄罗斯的EPM-ERA2010系列历表和法国的INPOP10a系列历表。EPM-ERA2010历表采用了1970年3月至2010年4月间的LLR观测资料,总共包括17 131个各激光测月台站的标准点数据,其中包含了APACHE测月站的643个标准点数据^[19]。INPOP10a历表采用了1969年至2010年间由Grasse、McDonald、Haleakala以及APACHE测站提供的LLR观测资料^[20]。JPL的DE/LE系列历表也都采用了类似的LLR数据。

3.3 岁差和章动

在太阳、月球和行星引力作用下,地球的自转轴相对于空间惯性参考系不断发生变化。地轴的空间运动可以描述为长期运动(岁差)和周期运动(章动)的合成。

经度章动和交角章动可以表示成由一系列的振幅不同且随时间变化的周期性椭圆运动叠加而成,如下式:

$$\Delta\psi = \sum_{i=1}^n (A_i + A_i' t) \sin(ARG_i) + (A_i'' + A_i''' t) \cos(ARG_i) \quad , \quad (4)$$

$$\Delta\varepsilon = \sum_{i=1}^n (B_i + B_i' t) \cos(ARG_i) + (B_i'' + B_i''' t) \sin(ARG_i) \quad . \quad (5)$$

其中,幅角 $ARG_i = \sum_{j=1}^5 N_{ij} F_j$, F_j 即传统的Delaunay变量。

通常, n 可取数百至千余,取决于对截断精度的要求^[21]。对章动角贡献最大的几个周期分别为18.6 a、182.62 d、13.66 d、9.3 a和365.26 d。对岁差和18.6 a主章动项的天文学测

定, 需要长时间的测量资料积累。20世纪80年代以前都只能通过经典光学天文资料计算, 精确度较差。在现代空间大地测量技术中, LLR历史是最长的, 而且18.6 a主章动项就是由于月球的白道升交点变化引起的, 因而LLR资料对它是直接敏感的; 因此, 在21世纪初之前, 尽管VLBI资料在相关领域发挥越来越主要的作用, 但在岁差和18.6 a主章动项的测定上, LLR仍是最主要的测定技术。

Biskupek等人^[22]利用1970年至2007年期间的LLR数据进行了拟合, 得到了各个周期项的章动系数取值(如表5所示)。由于标准点的时间分布不均匀, 13.66 d的短周期项很难通过LLR数据确定。将得到的4个周期项的结果与IAU推荐的2个章动参考模型MHB2000章动模型^[23](MHB2000模型中的9个关键参数是通过VLBI资料拟合获得的^[24])和HJL模型^[21]的结果进行比较, 列于表6。从表中可见, 18.6 a项的系数相差最大, 大于4 mas(经度项)和2 mas(倾角项)。相比于VLBI, LLR对月球轨道信息更加敏感, 而18.6 a的周期项正是与月球的升交点运动有关; 另一个原因可能是月球轨道和天平动等的模型不完善或者是上述章动模型的坐标参考系与LLR分析的坐标系不一致造成的。同时, 182.62 d黄经项(A_i'')和9.3 a周期项的章动系数(B_i 和 A_i'')的差别也较大, 都在1 mas以上, 具体原因的分析是一个有兴趣的研究课题。

表 5 LLR数据得到的不同周期章动系数的值和标准偏差^[22]

周期	A_i/mas	B_i/mas	A_i''/mas	B_i''/mas
18.6 a	-17201.75 ± 0.42	9203.59 ± 0.20	3.83 ± 0.31	3.92 ± 0.18
182.62 d	-1316.87 ± 0.15	572.91 ± 0.06	-3.13 ± 0.14	-1.02 ± 0.06
9.3 a	207.08 ± 0.32	-90.75 ± 0.15	1.38 ± 0.32	-0.19 ± 0.16
365.26 d	146.70 ± 0.22	7.82 ± 0.09	0.21 ± 0.16	-0.57 ± 0.07

表 6 LLR结果与MHB2000章动模型值^[23]和HJL章动模型值^[21]的比较

周期	A_i/mas	B_i/mas	A_i''/mas	B_i''/mas
18.6 a	4.67/4.52	-1.64/-1.55	0.49/0.56	2.38/2.61
182.62 d	0.22/0.10	-0.12/0.01	-1.76/-1.69	-0.56/-0.59
9.3 a	-0.38/-0.36	-1.00/-1.00	1.45/-1.43	-0.16/-0.17
365.26 d	-0.89/-0.87	0.43/0.40	-0.97/-0.04	-0.38/-0.40

说明: 斜线前后分别表示LLR结果减去MHB2000章动模型或减去HJL章动模型后的差值

3.4 月球物理参数

3.4.1 月球总惯量矩($A < B < C$)

目前我们对月球的总惯量矩信息来自于对LLR资料求得的 $(C - A)/B$ 、 $(B - A)/C$ 和月球轨道探测器得到的 J_2 和 C_{22} 。到目前为止, 关于月球总惯量矩正式发表的结果是Konopliv等人^[25]1998年得到的值, 那时候, 月核的惯量矩 C_f 的测定精度还很差。如果利用最新的LLR资料和月球轨道器探测资料, 应该可以大大改进月核的惯量矩 C_f 以及总惯量矩 A, B, C 的测定值, 并进而强烈约束月球内部的密度分布模型。

3.4.2 月核的惯量矩(C_f)

C_f 取决于月核的大小(半径和扁率)和密度分布。LLR对 C_f 比较敏感,已获得它与月球总体的惯量矩之比 $C_f/C \approx (12 \pm 4) \times 10^{-4}$ [26]。若假设月核是一个均匀流态的铁核,且无内核,则可以导出其半径约(390±30) km。如果降低其密度或者如果存在固态内核,则外核半径就会相应增大。此前的 C_f 值测定的精度不够,若利用长时间积累的高精度LLR资料有望提高它的精度,并进而提高我们对月核的了解程度。

3.4.3 月核的扁率(f)

与地球上从章动反推地球核幔边界的扁率类似,LLR通过天平动可以研究月核的扁率 f ,它对($f \times C_f$)很敏感,最近的测定值是 $f \times C_f/C = (C_f - A_f)/C = (3 \pm 1) \times 10^{-7}$ [26],由此可以推测有一个流体核。随着观测资料的积累和精度的进一步提高,利用LLR测定的天平动信息可以继续帮助改进上述值,并进而修正我们对月核的物理形态的认识。

3.4.4 月球物理参数

在目前各种测量地月轨道之间的潮汐加速的技术中,LLR是最直接、精度最高的。推算(历史上)以前的月球轨道对了解太阳系和地月系统的演化非常重要,但也非常困难。地球和月球的潮汐效应之和使轨道的平黄经加速度约为 $-25.85''/ct^2$ [27],相当于月球后退3.81 cm/a。在轨道的能量和角动量交换以及月球轨道后退的各种因素中,地球受到的潮汐力起到了重要作用。在LLR资料处理中,月球上受到的潮汐作用可以与地球上的潮汐作用分离开来;同时,LLR也能以较高的精度测定月球轨道偏心率随时间的变化率。从LLR得到的以上这些信息在研究地月轨道的长期耗散和演化过程中起到了非常关键的作用。

3.5 月球潮汐

与地球上的固体潮汐类似,月球在潮汐力作用下的弹性形变可以用勒夫数描述。潮汐位移由二阶勒夫数 h_2 和 l_2 表征,月球的转动与表征潮汐引力位的二阶勒夫数 k_2 直接相关,而月球固体潮汐与月球内部结构和物质的弹性性质直接相关;因此,通过LLR资料求月面上的潮汐形变以及二阶勒夫数(h_2, l_2, k_2)可以帮助我们加深对月球固体潮汐的了解[28,29]。

月球每个月潮汐位移的最大振幅大约为9 cm。遗憾的是月面上现有反射器的分布不利于测定与形变有关的勒夫数(垂直方向的 h_2 和水平方向的 l_2),但物理天平动对引力势勒夫数 k_2 敏感而容易以较高精度求出,而 k_2 与核的扁率高度相关;故在实际解算中,LLR的解对 k_2 更加敏感。勒夫数的理论计算值通常从预先给定的月球内部模型开始;同时,通过Apollo月震测量得到P波和S波的速度,可以研究月球的内部结构信息,但在月面100 km以下,获得的月震信息量很少[30]。Williams等人[31]利用1970—2003年的激光测月数据解算,先将 l_2 固定为模型值0.011,得到 $k_2 = 0.0227 \pm 0.0025$, $h_2 = 0.039 \pm 0.010$;如果考虑到半径约为350 km的月球液核的影响,且为了适应 $k_2 = 0.0227$,必须对月球的密度分布进行较小的调整,则通过模型计算可得到 $h_2 = 0.0397$, $l_2 = 0.0106$ [32]。

月球潮汐耗散与内部物质的品质因子 Q_s 直接相关。通常,当内部物质及其物理特性的分布确定后,耗散的 Q 值主要取决于潮汐频率;但通过测量月球潮汐耗散 Q ,LLR求出的 Q_s 都很低而且与频率的相关性很弱,约等于30(周月)或者35(周年),不支持低 Q 物质的存在[32]。然

而在月震频段内, 月震测量资料支持深月幔内存在低 Q 的物质区(疑似部分熔化)^[30]。随着越来越多观测台站的加入以及测距精度的提高, 如果能在潮汐形变资料中检测出毫米级的耗散效应, 则必将有助于解决上述似乎矛盾的问题。

3.6 天平动和月球内部结构

月球是离地球最近的一颗自然天体, 与地球有着非常多的相似之处, 当然也存在许多不同。月球保存了太阳系系统的撞击历史, 是研究太阳系及地球的生成与演化历史最理想的天然实验室。月球的内部结构和组成为发生过分异过程的行星体的演化提供了基本信息和研究样本。

就地球而言, 确定内部分层结构的技术主要是地震学测量, 而确定其内部各层的物理参数则主要来自于自由振荡观测、自转观测(包括日常变化、极移、岁差和章动等)、重力场测量、实验室高温高压模拟及动力学(包括热力学、电磁学、固体潮汐等)模型。对于月球而言, 尽管目前已接近“死寂”, 但仍然存在一些局部的小震动以及陨星/流星雨的撞击, 甚至登月机器人进行的人工月震也可供月震测量。

遗憾的是, 目前描述出的上述月球内部结构模型基本上是基于美国阿波罗计划期间在月球上A11和A12两个地点安装的月震记录仪提供的一些不完整的月震资料。这些资料信息显然是支离破碎, 甚至互相矛盾的, 因此得出的“结论”也是非常有限和模糊, 例如液核的大小、成分和状态(固体/液体), 是否还有一个固态的内核, 等等。

任何类地行星和月球都存在自转本振模, 它们受到内部和外部各种力的调制, 并存在耗散。LLR资料已确认两个较大的自由天平动, 意味着目前的激发仍然活跃^[33,34], 分别是2.9 a的经度天平动(约11 m的幅度)^[35]和74.6 a的绕极大椭圆摆动, 后者类似地球上的钱德勒摆动(CW), 其幅度约为28 m×69 m。一般认为该摆动是月球核幔边界(CMB)处所受潮汐而激发的。若果真如此, LLR从月极摆动轨迹资料中的不规则变化可以帮助我们揭示核幔边界附近的物理和动力学过程。月幔的第三个模即约81 a的自由岁差以及液核(如存在)自由核章动(FCN)的幅度都较弱, 在1 m以下。随着LLR资料积累和测距精度的大大提高, 前者应该可以检测出来, 而它与月球内部物理也密切相关, 因而也可以用来帮助研究月球内部物理。

4 我国激光测月技术的发展

上海天文台是我国SLR网的协调负责单位, SLR技术及其应用的研发在国际同行中一直处于前列。1992年开始白天激光测距的研究, 1997年成功实现白天对Lageos等卫星的测距, 现已具备白天常规的SLR观测技术, 能对在高中低轨飞行的所有卫星进行观测^[36]。2001年8月, 上海台采用皮秒计时器作测距试验, 测距精度达到7~8 mm^[37]。2008年成功实现了空间目标漫反射测距实验。开发出多卫星交替跟踪系统, 已实现卫星之间快速切换跟踪, 一般可在20 s内完成; 成功开展了双波长^[38,39]和高重复频率卫星激光测距实验^[40]; 在利用激光测距进行卫星与地面时间系统的同步以及全球范围的精密时间比对研究方面, 也取得了实质性进展^[41]; 自主研发的后向反射器已在多颗卫星上安装并平稳运行。

上海天文台从20世纪80年代便开始了SLR的数据处理和分析工作,是SLR区域数据中心和数据分析中心,负责国内SLR资料的归档,观测资料的评估,每周发表全球观测资料的评估报告;同时,利用国内及国际的SLR资料,进行天文地球动力学和大地测量等应用研究。

近年来,上海天文台一直在尝试开展LLR观测的工作。考虑到现有的SLR系统和60 cm望远镜的现状难以开展LLR观测,而上海佘山SLR站内同一园区有一台156 cm的光学望远镜;因此,建议在现有技术和设备的基础上进行改造,利用两台望远镜开展LLR异步观测(即一发一收,甚至一发双收以开展较差观测从而大幅提高观测精度)。针对我国探月工程三期的科学目标及其对月面登陆器精密定位的要求,参考国外的LLR经验,更积极开展LLR技术及其应用的研究:建立LLR地面发射和接收观测系统、月面后向反射器及其安装系统;其中,超强功率、高频和极窄光束的激光发射系统、微弱单光子辨认接收门系统等是需要加强攻关的关键技术。

上海天文台LLR小组从1985年开始LLR资料处理与分析工作。从1988年起成为国际地球自转服务组织(IERS)中全球LLR资料处理的3个分析中心之一,取得了一系列研究成果,在用LLR资料研究月球物理和地球动力学的领域中发表了一系列文章,如解算世界时(UT1)、地面和月面参考架、天平动、相对论效应等,并因此获得中国科学院技术进步一等奖等多项奖励。由于各种原因在20世纪末停止了LLR的资料分析工作。目前,已全面恢复以前的全球LLR资料分析工作,并开展相关的应用研究。

云南天文台的激光测距系统采用1.2 m地平式光学望远镜,经过多年的技术改造,望远镜的性能和观测精度有了很大的提高^[42]。望远镜于1990年投入使用,并于1998年在此基础上建成了第三代卫星激光测距系统(ILRS编号7820)。由于望远镜口径较大,具有0.2 J的激光器,对高轨卫星跟踪平稳,因而能对 2×10^4 km高的GPS35和36号卫星进行测距。在陆态网二期工程的资助下,自主开发了兼容原低频测距系统的共光路千赫兹卫星激光测距系统,测程达到3万多公里^[43];2010年11月收到白天测距回波。2010年对空间碎片进行测距实验,配置了4.5 J的高能量激光器,6月收到了回波^[44,45]。在月球激光测距方面也具有一定的技术储备,开展了一些测月数据应用、技术方法的研究。

在激光测月系统改进方面,云南天文台深入研究了大气湍流效应对测月激光束传输和探测回波光子数的影响^[46],提出了在激光测月中引入大气波前倾斜量的实时补偿技术^[47],以减少激光束在传输中受到大气影响而产生的扩展和飘移,使光子数集中,尽力提高由月面向后向反射器反射而回的激光光子数;经过理论计算表明,激光回波光子数将增加6~40倍^[7]。在测月系统中,云南天文台还研究了激光发射以及反射方向的光行差补偿问题,并建立了一个可编程伺服系统,通过控制程序,能使测月系统中的探测单元实时对准激光的回波方向,从而抵消光行差的影响。

在测月仪器方面,云南天文台研制了专门用于激光测月的事件计时器OTL100P,能精确测量激光脉冲发射和接收的时刻,从而精确计算激光脉冲的飞行时间;相比于传统的时间间隔计数器,其精度更高、稳定性更好、标准偏差更小,能够满足将来多脉冲激光测月对测时系统的要求^[48]。云南天文台也在积极研制新的激光器,预计将现有的器件改造为调Q加三级放大的激光器,其参数为:脉冲能量500 mJ,脉宽5~7 ns,波长532 nm,重复率8 Hz, LBO晶

体变频。

紫金山天文台也曾开展过月球激光测距空间试验预研究, 其历算团组在太阳系行星和月球历表方面开展了很有成效的工作。

总之, 激光测距的理论和技術已经很成熟, 借鉴国际上测月台站的成功经验, 经过对测距系统的进一步改造, 使其满足测月的技术要求, 上海天文台和云南天文台将来可成功获得激光测月的观测数据。

5 结 语

对月球激光测距数据的分析提供了关于地球、月球以及月球轨道方面的信息。LLR迄今已经历了40多年的发展, 测距精度在不断提高, 由LLR获得的科学研究成果也越来越多。

由于月球激光测距对地面台站观测设备各环节技术要求都较高, 全球能够实现LLR的测站很少, 并且分布很不均匀。为了进一步扩展LLR在相对论和地球-月球科学等方面的研究成果, 充分发挥LLR的潜能, 必须有更多和更广地理分布的测月台站参与进来。随着我国对月球探测系列活动步入高潮, 开展LLR观测与资料应用研究的工作也日趋迫切^[49,50]。目前, 我国也在积极对现有SLR台站进行升级改造(如云南天文台和上海天文台), 筹备新的测月站的建设工作(如新疆天文台), 上海天文台已经全面恢复之前的全球LLR资料分析与应用研究工作。相信不久之后, 我国激光测月的观测与相关研究工作会顺利开展起来, 为我国的探月工程和研究月球做出贡献。

致谢

感谢两位审稿人的仔细审阅和建议。

参考文献:

- [1] Kokurin Y L. *Quantum Electronics*, 2003, 33: 45
- [2] <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>, 2012
- [3] Barache C, Bouquillon S, Feraudy D, et al. *Proceedings of the 17th International Workshop on Laser Ranging*, Bad Kötzing; NASA, 2011
- [4] http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/apollo/norm_pts.html, 2012
- [5] Murphy T W, Adelberger E G, Battat J B R, et al. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2008, 120: 20
- [6] Battat J B R, Murphy T W, Adelberger E G, et al. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2009, 121: 29
- [7] 熊耀恒. 博士论文, 昆明: 中国科学院云南天文台, 2001: 6
- [8] http://spiff.rit.edu/classes/phys235/no_moon/retro/physics.ucsd.edu/tmurphy/apollo/doc, 2012
- [9] Müller J, Williams J G, Turyshev S G. arXiv: gr-qc/0509114,2005
- [10] Müller J, Williams J G, Turyshev S G. *Astrophysics and Space Science Library*, 2008, 349: 457
- [11] Hofmann F, Müller J, Biskupek L. *Astronomy&Astrophysics*, 2010, 522: L5

- [12] Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H. arXiv: gr-qc/0507083, 2009
- [13] Williams J G, Turyshev S G, Thomas W, et al. arXiv: gr-qc/0311021, 2003
- [14] 金文敬, 王强国. 天文学报, 1986, 27: 85
- [15] 黄乘利, 金文敬, 许华冠. 中国科学院上海天文台年刊, 1996, 17: 169
- [16] Huang C L, Jin W J, Xu H G. Journal of Geodesy, 2000, 73: 125
- [17] Chapront J, Francou G. IERS Technical Note, 2006: 97
- [18] Fok H S, Shum C K, Yi Y C, et al. Earth, Planets and Space, 2011, 63: 15
- [19] Pitjeva E V, Bratseva O A, Panfilov V E. Institute of Applied astronomy RAS, 2010: 49
- [20] Fienga A, Lashar J, Kuchynka P, et al. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2011, 111: 363
- [21] Huang C L, Jin W J, Liao X H. Geophysical Journal International, 2001, 146: 126
- [22] Biskupek L, Müller J, Hofmann F. In: Kenyon S ed. Geodesy for Planet Earth, Hannover: Springer, 2012: 63
- [23] Gerard Petit, Brian Luzum eds. IERS Conventions(2010), Frankfurt: BIPM, 2010: 61
- [24] Mathews P M, Herring T A, Buffett B A. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(2068): 26
- [25] Konopliv A S, Binder A B, Hood L L, et al. Science, 1998, 281(5382): 1476
- [26] Williams J G, Boggs D H. In: Schilliak S ed. Proceedings of 16th International Workshop on Laser Ranging, Poznan: Space Research Centre, Polish Academy of Sciences, 2009: 119
- [27] Xu H G, Jin W J, Huang C L. Earth, Moon and Planets, 1996, 73: 101
- [28] Bois E, Journet A. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 1993, 57: 295
- [29] Goossens S, Matsumoto K. Geophysical Research Letters, 2008, 35: 5
- [30] Lognonne P, Johnson C. Planetary seismology, Treatise on geophysics, 2007, 10: 69
- [31] Williams J G, Dickey J O. In: Noomen R, Klosko S eds. Proceedings From the Science Session and Full Proceedings CD-ROM, Washington D C: NASA, 2003: 75
- [32] Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H, et al. Advances in Space Research, 2006, 37(1): 67
- [33] Newhall X X, Williams J G. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 1997, 66: 21
- [34] Rambaux N, Williams J G. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2010, 109: 85
- [35] Eckhardt D H. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 1993, 57: 307
- [36] 王斌, 张忠萍, 杨福民等. 中国科学院上海天文台年刊, 2004, 25: 63
- [37] 杨福民, 陈婉珍, 张忠萍等. 中国科学(A辑), 2002, 32(10): 935
- [38] 张忠萍, 李人东, 杨福民等. 天文学进展, 2005, 23(2): 99
- [39] 李人东, 张忠萍, 杨福民等. 激光技术, 2005, 29(6): 645
- [40] 张忠萍, 吴志波, 张海峰等. 激光与红外, 2009, 39: 1267
- [41] 王元明, 杨福民, 黄佩诚等. 中国科学(G辑), 2008, 38: 217
- [42] 伏红林, 冯和生, 张云成等. 天文研究与技术, 2004, 1: 307
- [43] 郑向明, 李祝莲, 伏红林等. 光学学报, 2011, 31: 1
- [44] 翟东升, 伏红林, 何少辉等. 天文研究与技术, 2009, 6: 13
- [45] 李语强, 李祝莲, 伏红林等. 中国激光, 2011, 38: 1
- [46] Xiong Y H, Guo R. In: Proceedings of 14th International Workshop on Laser Ranging, San Fernando: NASA, 2004
- [47] 郭锐, 熊耀恒. 天文学报, 2004, 45: 413
- [48] 李祝莲, 熊耀恒. 天文研究与技术, 2008, 5: 161
- [49] 魏二虎, 常亮, 刘经南. 测绘信息与工程, 2006, 31: 1
- [50] 郑向明, 郭锐, 李语强等. 天文研究与技术, 2007, 4: 231

On the Observation and Research of Lunar Laser Ranging

HUA Yang^{1,2}, HUANG Cheng-li^{1,3}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Planetary Sciences Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: The development of global lunar laser ranging (LLR) is reviewed briefly, including the statues of the stations and lunar retro-reflectors, the available data and their three formats, and comparison of the LLR systems. The technique used in the LLR system at Apache Point is introduced, and the factors dominating the observation precision are analyzed. In the second part, the scientific studies from the LLR data is summarized, including testing of the gravitation theories, determining the terrestrial coordinates of stations and lunar coordinates of retro-reflectors, monitoring the earth orientation parameters, improving the planetary/lunar ephemerides, solving the parameters of lunar physics, studying the lunar libration and the physics interior the Moon, as well as the lunar tides, etc. The statues of the techniques development and experiments in laser ranging in China are introduced in the third part, and the effort to extend the SLR techniques to LLR observation in Chinese stations is also encouraged and prospected.

Key words: Lunar Laser Ranging; selenophysics; APOLLO