



中国地质大学

CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES



2009. 10. 24

北京探工会

宇宙探索与钻探技术



中国地质大学（武汉）

鄢泰宁 段新胜

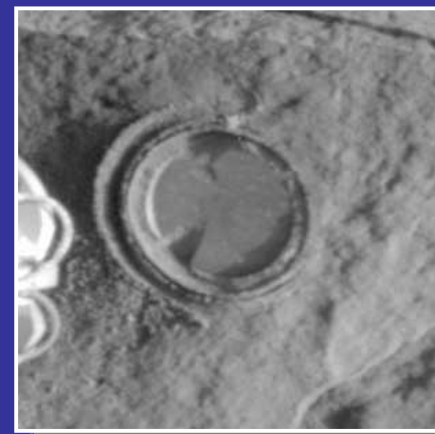
2009年10月24日





一. 问题的提出

- 以前，人们仅强调钻探是地学研究、资源勘探开发、城镇建设、灾害防治的重要手段。对于它在宇宙探索中的意义却知之甚少。
- 40年前美、苏完成了月球钻探的壮举，2005年美国“勇气”“机遇”号完成了人类火星第一钻（深2.7mm、直径45mm）并在“El Capitan”的岩石表面钻了4mm深的孔。
- 钻探工程师们非常自豪，自己的专业已成为人类探索宇宙的首批技术之一。





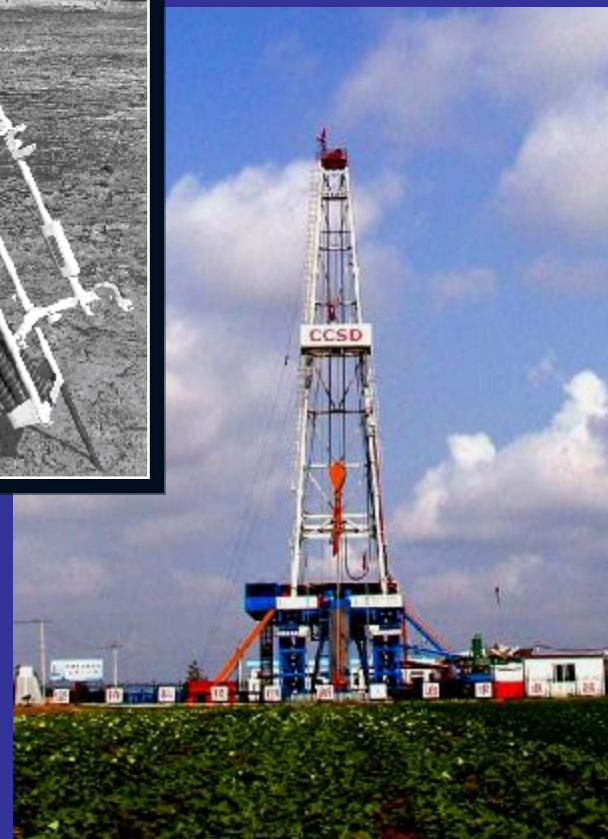
- 其实，钻探为宇宙探索服务并非从1969年开始。1908年6月30日西伯利亚曾发生陨石落地烧毁森林的事件。探索陨石和宇宙秘密的勇敢者于1929年曾用2台手动钻机在陨石落下的地方钻了3个34m深的钻孔。首次用钻探的方法探索宇宙问题。
- 后来，美国人也曾用钻探手段来研究陨石。钻探公司为了吸引资金曾放出陨石碎片中富含铂金的流言，并钻了几个200m深的钻孔。但随着铂金陨石预言的破灭该公司最终也破产了。
- 人类何时才能看到其它行星内部的物质成分？解开行星进化规律、生命起源等谜团。寻找宇宙生命起源的秘密不仅是科研问题，更涉及到人类文明的命运。宇宙探索过程本身已表现出越来越明显的工程性质，其第一步就是取回天体的岩样，唯一的方法是——钻孔。



- 当然，钻探技术大规模应用于宇宙探索是以1969年开始的月球钻探取样为标志。
- 月球是地球的近邻，它既是一个理想的深空探测中继站，又是具有重要战略意义的太空基地。月球上特有的矿产和能源，是对地球资源的重要补充和储备。
- 美国航空航天局(LASA)制定了《月球探测》《阿波罗》和《后阿波罗》3个月球探索规划。
- 俄罗斯提出了重返月球的规划。日本、印度等国都发射了探月飞船，成为月球俱乐部的新贵。
- 我国探月概括为“绕”、“落”、“回”三个阶段。其中嫦娥3期的重点是月表钻探取样。这对于研究月表环境、地质构造、月表矿物成分、月球基地选址等众多科研方向都具有战略意义。



- 国际钻探界普遍认为，按钻探的复杂程度和难度，排在首位的是外行星钻探技术和超深钻。由于外行星钻探只需钻一个小孔，其复杂程度比在地球上钻15km以上的超深孔要小。所以，人类实现月球钻探的时间比地球完成超深钻要早很多。





- 技术难点（以月球钻探为例）

- § 运载工具对月球钻机的重量、尺寸、功耗有严格限制。

- § 据资料，14cm以下的月壤很致密。但月表既无空气又无水，如何排除岩粉和冷却钻头。

- § 足够的钻压是保证钻探速度的最重要因素。但月面的重力仅为地球的1/6。靠钻机自重提供钻压的方案不可取。如何在月球条件下快速钻进。

- § 月表除极少数裸露的基岩外，月壤的内聚力小，结构松散。这类岩石在地球上也属于难取样范畴。如何自动摆放、密封岩心，保持原生层状结构并安全返回地球。

- § 钻机的普通润滑剂在月球超真空环境中会蒸发。昼夜温差300℃左右。



二. 美、苏曾实现的月球钻探技术现状

项目	美 国						前 苏 联		
	A.11	A. 12	A.14	A. 15	A.16	A. 17	Lu. 16	Lu. 20	Lu. 24
执行日期	1969.7	1969. 11	1971.2	1971.7	1972.4	1972.12	1970.9	1972.2	1976.8
取样方式	人工钳、耙、铲、锤击 取样			人工操作回转钻取兼手工 取样			遥控回转钻取并自动封装		
取样质量/kg	22	34.6	42.6	77	95	110.5	0.101	0.050	0.1701
取样深度/mm	月面			2360	2180	3050	350	290	2250
取样直径/ mm				20~30			18		8
取样动力/ W				430			280		>100
钻杆转速 /r/min				280			500		
钻机自重/kg				13.4			13.6		27
钻进给力/N				钻机自重+人工给进			120		钢绳加压
钻进速度/mm /min				70~150			57		80~240



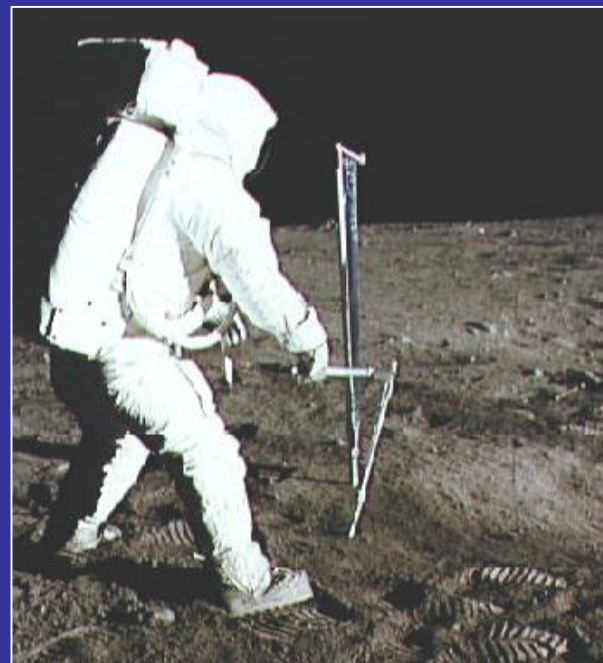
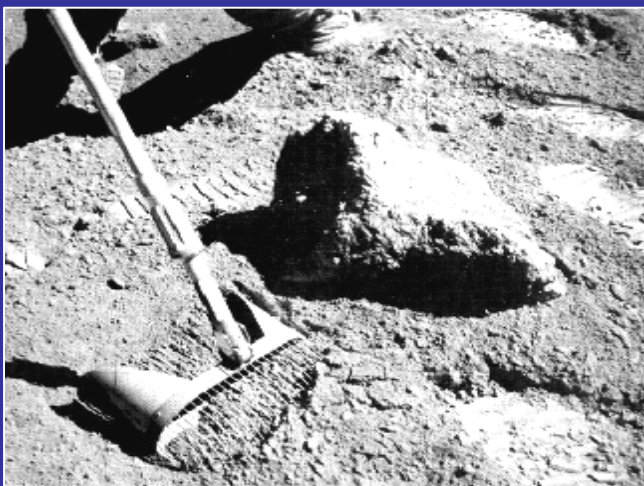
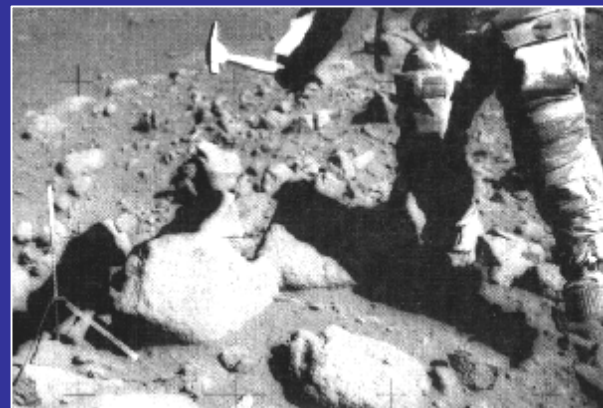
虽然人类已完成的9次月表钻探采样工程是33~40年前完成的，但仍可看出以下特点：

- 每次取回的月球样品数量差别很大(0.05~110kg) ——体现的是无人登月和有人登月、纯钻取和钻取+人工拾取的差异。
- 无人登月的情况下每次登月只钻一个回次取样。仅靠遥控无人钻取不可能大幅度提高月壤样品的数量。
- 无论无人或有人登月，对月表钻机的自重严格限制（13.4kg、27kg）。
- 无人登月钻机动力280W，有人登月为430W。



§ 美国“阿波罗11号”载人登月以来，取回379.8kg样品。主要来自手工取样。

§ 自阿波罗15-17起带有宇航员操作的月表钻机和带钻头的岩心管（ $\Phi 20\sim 40\text{ mm}$ ，长700mm）。





Item	A. 11	Al. 12	A.14	A. 15	A. 16	A. 17
可控铲子	0	0	0	1	1	1
加长柄	1	1	1	1	2	2
钳子	1	1	1	1	2	2
耙子	0	0	0	1	1	1
岩芯管	2	4	6	0	0	0
岩芯管帽	2	1	0	0	0	0
月球表面钻机	0	0	0	1	1	1
带钻头的岩心管	0	0	0	1	1	1
无钻头的岩心管	0	0	0	5	5	5
自动记录贯入仪	0	0	0	1	1	0

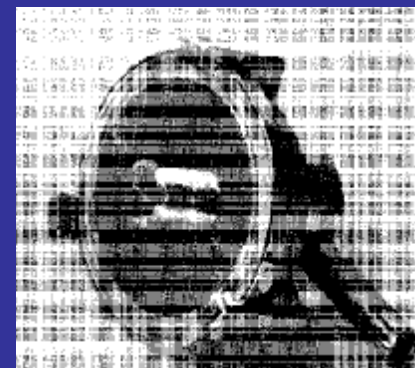


- 《阿波罗-11》 3名宇航员花35~40分钟用地质锤把取土器打入月壤取出两份深度15cm的 $\Phi 20\text{mm}$ 岩心。取样管内装有活塞方便取出岩心。但接近宇航员的体力极限都无法打入更大的深度。且土样在管内被压实破坏了地层的自然层序。
- 通过改进取土器结构，可以较小的力打入并从深度70cm处取出土样。后续的《阿波罗-15、16和17》用自动记录式锥入仪，最大侵入深度达75cm。
- 从《阿波罗-15》开始，宇航员携带了手动取样电钻。





- **钻进方法**。美、苏手动或自动月面钻机都采用螺旋排屑+传统取心钻进（硬质合金钻头、传统岩心管和卡心装置）组合技术。
- 从原理上讲该方法远非新技术，50年代就已经有了单人操作的轻便式螺旋钻机。**美国**宇航员使用的手电钻的主要差别仅在于钻机的重量、强度特性和发动机类型。
- 在万有引力较低的条件下采用螺旋组合钻进，可部分地补偿传统螺旋钻进的不足（限制使用的范围：粘性和松散岩石；螺旋排屑效率低时与孔壁摩擦力增大；在深孔条件下能量消耗大，等等）。



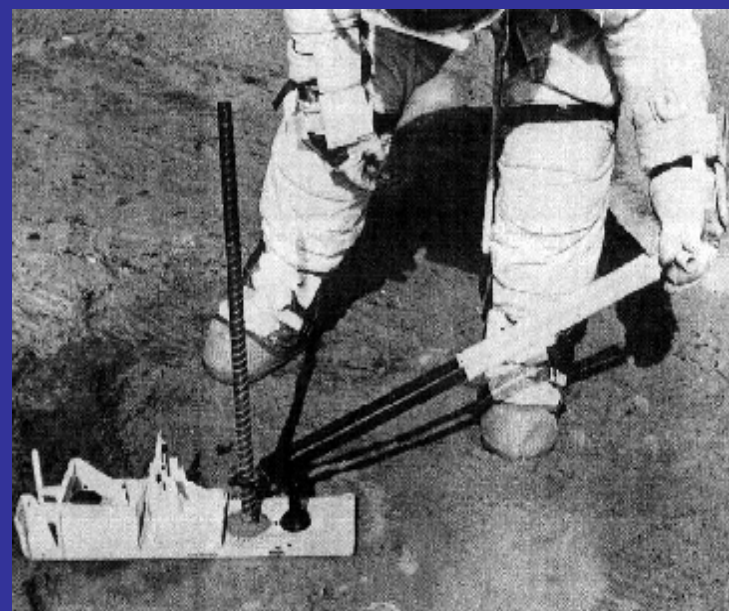
岩芯样品封装
真空筒：
外径：6.1cm
总长：41cm
适合永久保存



- 组合式螺旋取心钻进方法拓展了螺旋钻进的使用范围，甚至可用于钻进硬岩石。
- 如果在环状间隙中，由于离心力的作用和孔底被破碎而松动岩石的支撑作用，移动的钻渣与静止地层之间摩擦力足够大，那么钻渣可沿钻杆螺旋向上位移。只有螺旋钻杆的转速达到临界值，离心力才能达到所需的值；如果小于临界值则很难向上输送钻渣。但是在重力很小的情况下，在重力明显小于地球的行星上，转速的临界值可取较低值。
- 用螺旋清洁孔底的方法非常简便，但随着钻孔加深，螺旋的输送效率下降，而来自地表的冲击力也会逐渐失效。



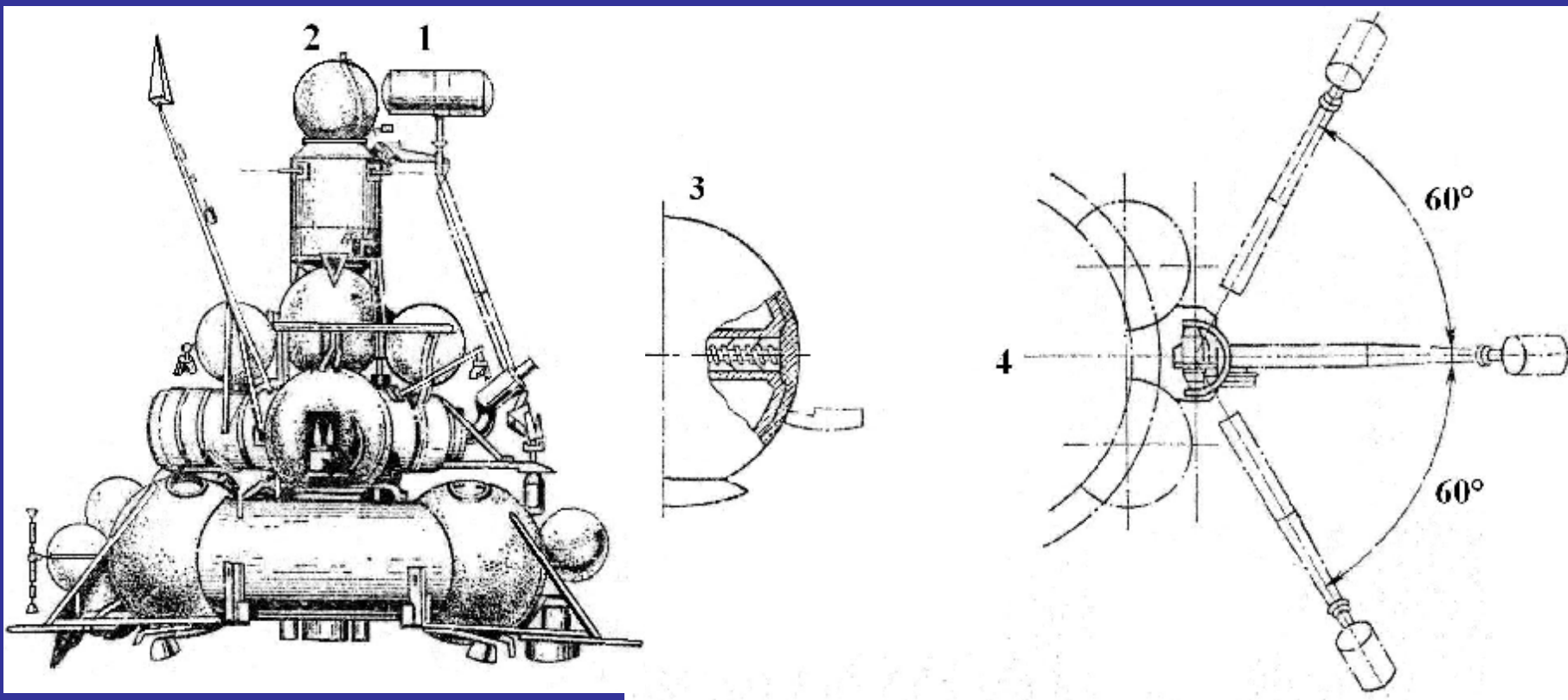
- Apollo-15钻到150cm后，经常出现回转阻力矩剧增，钻机摩擦离合器打滑。
- Apollo-16在72~80cm段无样品，80~120cm段样品断断续续。
- Apollo-17 在38~40cm和71~80cm的取样管区段无样品。
- u Apollo螺旋钻具在钻机自重和宇航员给进力共同作用下，钻入月壤并不困难（有如木螺钉），但钻达设计深度后往往从月壤中起拔岩心管很困难。于是**美国人**专门设计了从孔内撬出钻杆和岩心管的工具。
- u 但在无人登月的情况下，必须解决这个难题。



宇航员利用脚踏板和撬杠将钻杆和岩心管从孔内撬出



前苏联的Luna计划

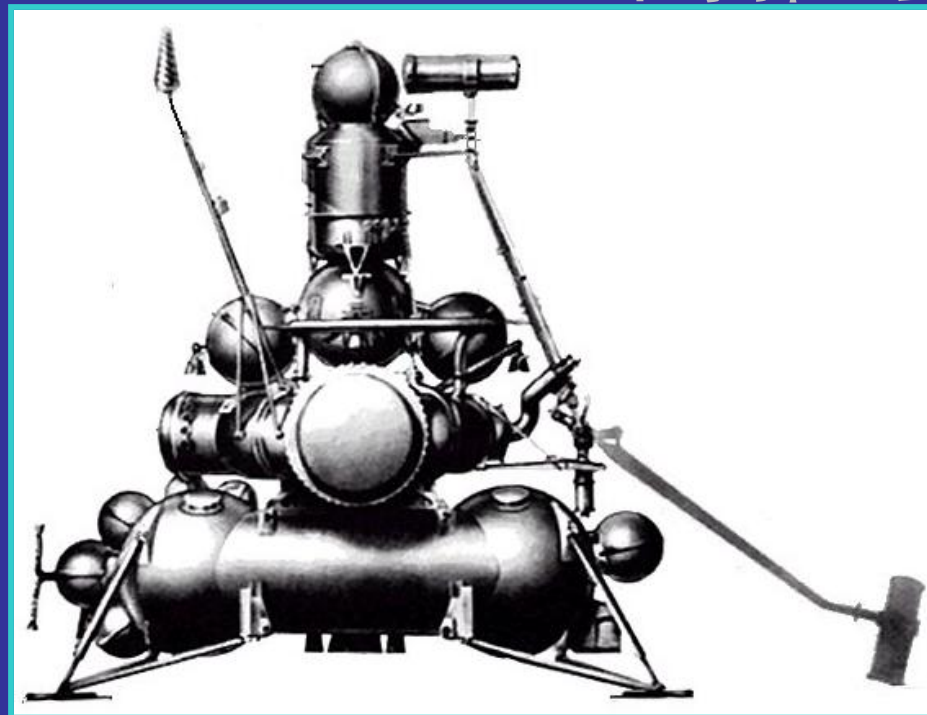


1-钻机；2-返回舱；3-月壤样品与岩心管的密封示意图；4-可以在水平面驱动钻机位移的杆件



《Luna16》、《Luna20》

- 钻杆长400mm,只钻1个回次,最大钻深35cm;
- 钻头外径26、内径18mm。
- 给进: 差动螺旋+冲击
- 钻头: 硬质合金
- 排屑方式: 螺旋方法。



《Luna-16》
钻机实物
及其打开
图片



- **Luna16**着陆后，机械臂将钻机置于月表。打开外保护罩，钻机轴线与垂线成 15° 倾斜钻进，经过6分14秒钻了350mm——达设计深度。确认样品进入钻具后，机械臂将钻机摆起至返回舱附近，钻机旋转180度，使钻头伸入返回舱内的样品箱，钻具接头自动脱开并密封样品箱，完成采样操作。共取样101g；很成功。



Luna-16采集的月壤样品



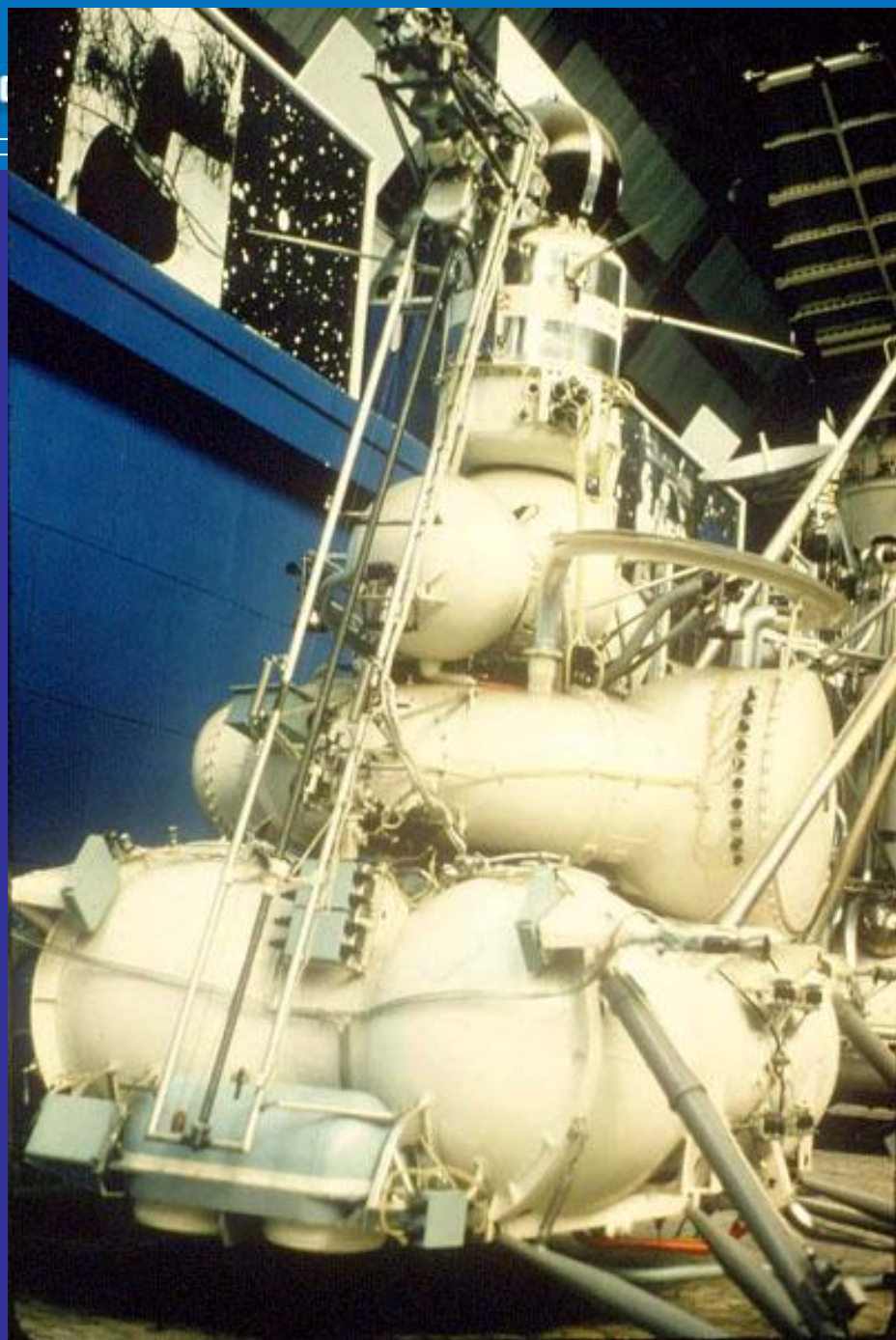
- **Luna-20**用相同的钻机，着陆点不同。钻进过程中三次断电保护：进尺深度90mm处，150mm处和340mm处，然后由于电机自动断电而结束钻进。
- 钻探持续了16分钟；钻速46~240mm/min不均匀，明显>说明书给出的60mm/min。
- 这些现象与《Luna-16》钻进过程明显有区别。表明，孔底岩石对岩心管表面的粘附力很不均匀，而且在螺旋通道的间隙中被压实了，钻进时螺旋机构不能及时排除岩屑，保证孔内清洁。被压实的土将产生附加回转阻力和钻具前移阻力。
- 完成钻进和启动月壤样品返回设备之后，钻机将根据地面指令检查月面温度和真空状态对钻机各构件的影响。最终返回地球的月壤只有55g，应该说**Luna-20**并不很成功。



- u 为了钻得更深，必须解决2个问题：增大钻压、减小样品封装返回容器的尺寸。
- 1976年8月 《Luna-24》 新型钻机登上月球。在不改变登月舱外形尺寸的条件下，设计钻深2500mm，实际钻深2250mm。阶梯式硬质合金钻头直径减少为1/3，从而减少钻进能耗；岩心直径也相应减少为8mm；
- 采用3层取样管，柔性内管和岩心被缠绕在卷鼓螺旋槽中，使大于2m的岩心可容纳在40cm高的返回舱中；
- 钻机进入工作状态不必转动机械臂，而是让钻机沿着两个定向滑道向下滑动。
- 通过钢索系统给进；根据所钻岩石的可钻性自动转换到冲击钻进状态；钻机上的自适应程序还具有事故报警的功能。。



- 各部件加工精度达到了仪表制造水平。
- 沿与月面垂线成 30° 的方向钻斜孔。在10分钟内进尺了约1.5m。岩石硬度增大时，钻机自动转换为冲击-回转规程。
- 钻进过程中连续跟踪每个瞬时的工况，分析遥测信息并随时发往控制中心，及时通报取样的起始时间，月壤的强度和孔深等数据，及时向月表钻机发出指令。





- 从月表往下约有60mm未取上样品，60~2200mm间样品重170g，实际岩心长度仅有160cm，岩心采取率为71%。
- 钻进过程完成后开始进入返回行程。随着输送机构启动，柔性内管中的岩心开始进入水平转动的卷鼓螺旋槽中。弹簧把卷鼓推入返回舱的样品箱。
- 引爆电燃药筒炸断给进机构的钢索和支架的固定端点，使钻机向后仰，并倒向另一面，和登月舱一起留在月球上。
- 《Luna-24》的成功无人钻探取样在世界上获得一致好评，也为我国的探月计划提供了重要参考。





三. 我们的任务及对策

1. 设计指导思想

- 在吸收美国、前苏联当年探月工程经验的基础上，在现有技术、经济条件下，充分发挥中国人的创新能力，研制高起点，功能可靠，结构简单的月球样品采集、封装及转移系统，保证返回地球的月壤样品数量和质量尽可能满足月球科学研究的要求。
- 为了达到“技术上可实现，经济上可承受，代表国家水平”的三期工程指导思想，我们在制定样品采集、封装与转移技术方案的过程中，需要按照以下原则展开：



- 可靠性与经济性优先原则：由于我国国力有限，探月三期采样方案应在确保可靠性前提下，充分考虑经济性指标，以达到用较小的代价成功完成采样返回任务；
- 广泛借鉴与自主创新相结合原则：方案制定过程中，应在充分消化理解并有效借鉴以往探月采样技术成果及工程经验的基础上，结合我国科学技术的发展现状，特别是继承探月二期成果的基础上，创造性地开展方案论证工作，争取在技术集成方面获得突破；
- 满足探测器系统约束的原则：探月工程是一个系统工程，采样方案应服从于大系统的接口约束和运载能力的约束，采样方案的机械接口、电气接口、控制接口要在服从于大系统需要的前提下开展。



3. 展望

- 钻探的重要任务是从孔内取出足够的岩心。如果说在地球条件下保证采取率都是一个问题的话，那么靠操作员在地球上发指令，让钻机在离我们几十万公里之外的星球上自动钻进，其获取岩心的难度便可想而知了。
- 在月面取岩心只能钻进一个回次，如果钻进失败想要重复钻进是不可能的。因此，取样器应有100%的绝对可靠性。
- 到目前为止，月球上所有完成的钻孔还没有超过3m。随着月球和行星的开发，出现了新的任务，包括钻进10m甚至更深的钻孔。新的条件要求研制不靠螺旋机构也能排除岩屑，冷却钻头的新钻探设备，而且要有孔底冲击功能。



- 难度最大的当数金星钻探取样。原则上可利用月球取样装置。但金星表面很坚硬，要用重型钻机，而且表面温度很高，需要增加冷却装置、结实的密封舱和自适应操作程序。由于许多原因，要真正实现金星钻探还很遥远。
- 当务之急，国内钻探界及其领导要非常关切嫦娥工程月球钻探取样问题，人家已经开始预研究和室内试验工作，如果我们不发出声音，不拿出预研究的成果，我们整个以钻探为职业的群体将在国家重大工程中被边缘化。

谢谢!