

基于模拟月壤的表层采样试验研究

段隆臣¹, 李 谦¹, 张大伟², 高 辉¹, 刘 宾²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘 要:目前月球采样可分为深层采样和表层采样,作为深层采样的有力补充,国内外针对表层采样研发了多种不同类型的采样机具,但对机具和月壤相互作用鲜有研究。针对月球表层采样设计了 2 套采样机具,能够实现挖取、铲取、夹取和振动贯入 4 种动作。通过相应的传感器,采样机具能在运动过程中实时检测机具承受的力矩(力)。利用 6 种不同性质的模拟月壤,用 2 套采样机具分别就不同的运动参数进行了相关试验。通过对试验现象的观察可知模拟月壤与常规沙土性质不同,会出现特定的表现;通过对试验数据的分析可知,除挖取动作外其余 3 种动作机具运动与受力的关系为近似线性关系,而挖取动作机具承受扭矩分为 4 个阶段,与机具运动位置有关。

关键词:月球采样;表层;模拟月壤;试验

中图分类号:P634.4⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)01-0003-06

Experimental Research on Surface Sampling Based on Lunar Soil Simulants/DUAN Long-chen¹, LI Qian¹, ZHANG Da-wei², GAO Hui¹, LIU Bin² (1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Lunar sampling consists of deep sampling and surface sampling. As a powerful supplement for deep sampling, multiple sampling tools are designed for surface sampling, however little research is focus on the interaction between sampling tool and lunar soil. Two simulated sampling tools, which could implement four actions (including digging, shoveling, clipping and penetration with vibration), were designed for surface sampling in this paper. By using the corresponding sensors, the torque (or force) acting on sampling tools can be monitored in real-time. The experiments were made on different motion parameters by use of six different lunar soil simulants and two sets of sampling equipments. Based on the observation during the experiments, specific phenomena appeared due to the different properties of lunar soil simulants and usual sand; and according to the analysis on experiments data, it is showed that excepting digging action, the relationship between the implement movements by the rest three actions and the force is an approximate linear one, while the torque on the implement of digging action is divided into 4 stages depending on the implement movement position.

Key words: lunar sampling; surface; lunar soil simulant; experiments

0 前言

自 20 世纪 70 年代美国 Apollo 计划和前苏联 Luna 计划成功完成月球采样以来,世界各国均对太空探测采样表现出极大的热情。太空采样从深度上可分为深层采样和浅层采样。就深层采样而言,目前世界各国设计机具的核心均为钻取式采样,只是在结构和取心方式上略有不同。但钻取式采样机具结构和施工工艺较为复杂,可能为成功采样留下隐患,在前苏联的 Luna 计划中,采用无人值守的自动钻取式采样,3 次成功采样仅带回样品 0.321 kg^[1]。

因此表层采样作为深层钻取式采样的有力补充也受到了国内外的高度重视。相对于深层采样几乎唯一的钻取式方案而言,表层采样方案可采用挖取、铲取、夹取、研磨等多种方式^[2]。1975 年 NASA 发

射的海盗号探测器在进行火星表层采样时采用的方案为铲取方案^[3];1997 年香港理工大学“行星表面小样本采样工具”设计利用夹钳的形式采取块状样品^[4];2003 年 NASA 火星探测器上携带的研磨机构能够自动研磨火星表面岩石并现场分析裸露出来的岩心^[5]。除此以外,国外相对比较前沿的研究也进行了超声波、仿生式表层采样设备的研发和试验^[6,7]。国内学者针对我国月球探测的需要先后研发了卷簧式、仿 Luna 计划和海盗号探测器的表层采样机构,并进行了相关试验^[8-10]。

但国内外针对表层采样相关研究在采样机具与月壤相互作用上较少,基于此本文进行了相关试验研究。试验的主要目的在于针对表层采样进行多种机具、多种动作在多种模拟月壤中进行系列试验,通

收稿日期:2013-09-22

基金项目:中国航天五院项目“表采机构与月壤的相互作用机理及仿真分析平台的研究”(201205G007)

作者简介:段隆臣(1967-),男(汉族),江西都昌人,中国地质大学(武汉)教授、博士生导师,探矿工程专业,博士,研究方向为岩石破碎与金刚石工具,湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号,duanlongchen@163.com。

通过对试验数据的分析、对试验现象的观察为后期相互作用的理论分析奠定坚实的试验基础。

1 试验机具设计

1.1 机具结构设计

从采样机具紧凑性和功能多样性考虑,设计机具如图1、图2所示,采用甲、乙两套不同的模拟采样设备完成挖取、铲取、夹取和振动贯入试验。

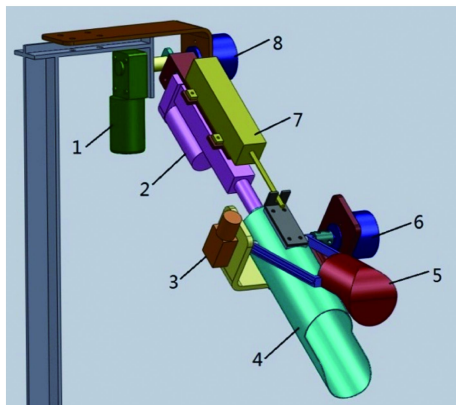


图1 模拟采样器甲结构图

1—1号直流电机;2—电动推杆;3—2号直流电机;4—主体盒;5—上金属罩;6—2号旋转编码器;7—位移传感器;8—1号旋转编码器

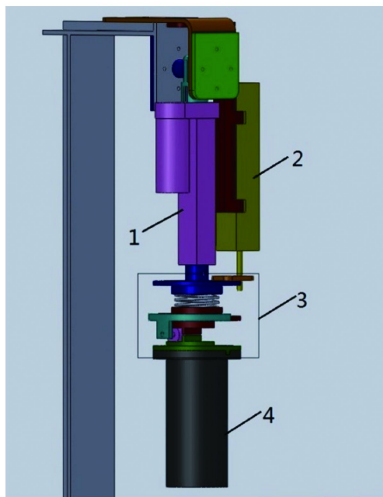


图2 模拟采样器乙结构图

1—电动推杆;2—位移传感器;3—振动发生装置;4—振动贯入筒

1.1.1 采样器甲

如图1所示,采样器甲整套机具固定在支架上。其中直流电机1可带动整套机具悬臂在 180° 的范围内进行旋转运动,同时通过旋转编码器8可测量机具悬臂的旋转位移。电动推杆2固定在机具悬臂上端,可推动机具悬臂末端在直线方向进行伸出和

回拉运动,同时位移传感器7可实时检测机具悬臂末端的伸出位移。机具悬臂末端由一个直流电机3,一个旋转编码器6、一个主体盒4和一个上金属罩5构成。直流电机3可控制上金属罩5在机具悬臂所处平面内进行有限的回转运动,同时利用旋转编码器6检测上金属罩的旋转位移。

通过各部件的相互配合,采样器甲可完成的动作如下。

(1)挖取动作:如图3所示,首先通过直流电机1将机具悬臂摆至水平,而后通过控制直流电机3即可完成挖取动作的模拟。

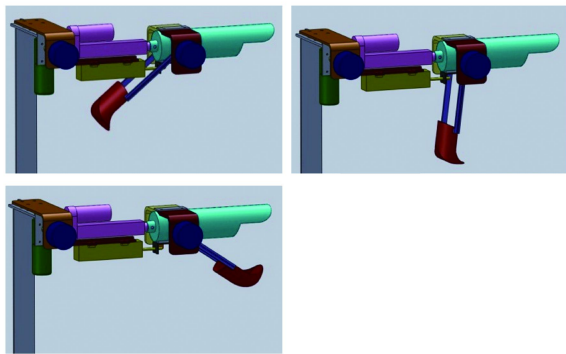


图3 模拟采样器甲挖取动作分解图

(2)铲取动作:如图4所示,首先通过直流电机1将机具悬臂摆至设计铲取的角度,其次通过电动推杆2将机具悬臂末端向前伸出完成铲取动作中下铲的动作,达到设计位移后再通过直流电机1控制机具悬臂摆动完成铲取动作中上扬的动作。在上扬动作中,为了防止铲取的样品遗失,可通过直流电机3将上金属罩5盖住主体盒4的铲斗部分。

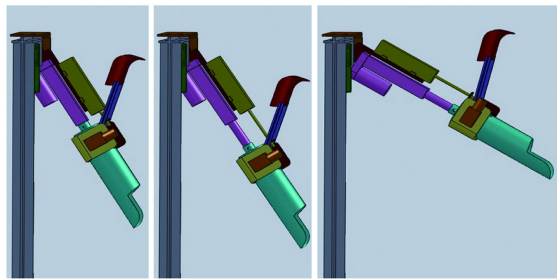


图4 模拟采样器甲铲取动作分解图

(3)夹取动作:如图5所示,类似铲取动作,首先通过直流电机1将机具悬臂摆至需要夹取物品附近,其次通过电动推杆2将机具悬臂末端伸长使主体盒4铲斗端靠近被夹物体,而后控制直流电机3将上金属罩盖下,利用上金属罩5和主体盒4的铲斗将物体夹住,而后控制直流电机1旋转机具悬臂完成夹取动作。

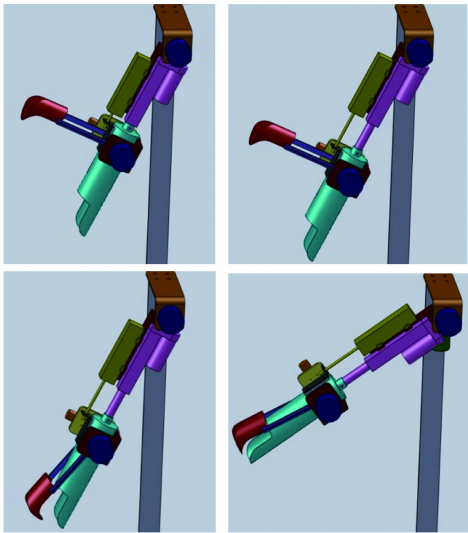


图5 模拟采样器甲夹取动作分解图

1.1.2 采样器乙

如图2所示,采样器乙整套机具固定在支架上,总共由电动推杆1、位移传感器2、振动发生装置3和振动贯入筒4四个部分构成。振动发生装置3装配在贯入筒4和电动推杆1之间,如图6所示,通过偏心振动电机偏心块的旋转实现了贯入过程中振动的效果,其间安装的弹簧用以抵消振动效果向上的传递。实际试验过程中,通过电动推杆1即可控制振动贯入筒的上下运动,其间位移传感器2可实时读出振动贯入筒的贯入位移。通过对振动电机的控制即可使采样器乙实现振动贯入或静力贯入的效果。由于试验的主体在于研究机具采样过程中与月壤之间的相互作用,因此针对采样器乙没有单独设计封装采样的机构,而只进行贯入试验。

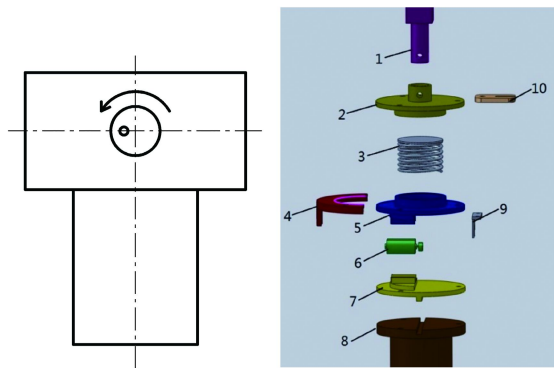


图6 振动发生装置原理(左)及拆卸图(右)

1—电动推杆;2—缓冲连接板;3—减震弹簧;4—夹持挡板;5—夹持上盖板;6—振动电机;7—夹持下盖板;8—振动贯入筒;9—夹持上盖板挡键;10—位移传感器连接板

1.2 机具检测系统设计

设计该模拟采样机具的主体目的在于研究表层采样机具与模拟月壤之间的相互作用,即实时测量机具在表层采样过程中受到的力矩(力)的作用。由于试验机具尺寸的限制,在机具结构设计中采用了间接测量的方案。从采样器甲和采样器乙的结构设计中可以看出,2个采样器在运动过程中所有的动作均由直流电机进行控制(电动推杆也是由直流电机控制),而直流电机自身的工作特性决定了其工作电流与负载成比例关系,因此在实际机具加工的过程中利用电流传感器测量控制运动的直流电机电流,再通过比例换算得出最终的机具受力矩(力)。为了更加精确的表明机具在运动过程中某一时刻的受力情况,在2套采样机具的设计过程中也加入了对角度(旋转编码器)和直线位移(位移传感器)的检测。基于上述分析,综合设计在2套模拟采样设备中需要检测的参数及使用的设备如表1所示。

表1 模拟采样设备检测参数设计

采样设备	检测参数	检测设备
采样器甲	机具悬臂旋转位移(角速度)	旋转编码器
	机具悬臂旋转扭矩	电流传感器
	上金属罩旋转位移(角速度)	旋转编码器
	上金属罩旋转扭矩	电流传感器
	主体盒直线位移(速度)	位移传感器
	主体盒切入阻力	电流传感器
采样器乙	振动贯入筒位移(速度)	位移传感器
	振动贯入筒阻力	电流传感器

选定检测参数及其相应的传感器后,整套机具的检测控制方案如图7所示,通过手动直接控制采样器甲和采样器乙的运动电机,而各个运动涉及的传感器则通过数据采集卡将信号统一采集至计算机中进行存储、回显和后续数据分析。

2 试验模拟月壤制备

试验中采用的模拟月壤来源于中国地质大学(武汉)行星科学研究所提供的CUG_1.50型物理等效模拟月壤以及CUG_1.25型和CUG_0.50型力学等效型模拟月壤。CUG_1.50型物理等效月壤无论是成分还是物理力学性质均与真实月壤相近,而CUG_1.25型和CUG_0.50型力学等效月壤则是在制作过程中掺入了一定的低密度材料,使其整体密度降低,用以模拟不同的重力环境。

试验中采用的3种模拟月壤外形相似,但表现性质略有区别。CUG_1.50型模拟月壤整体颜色偏

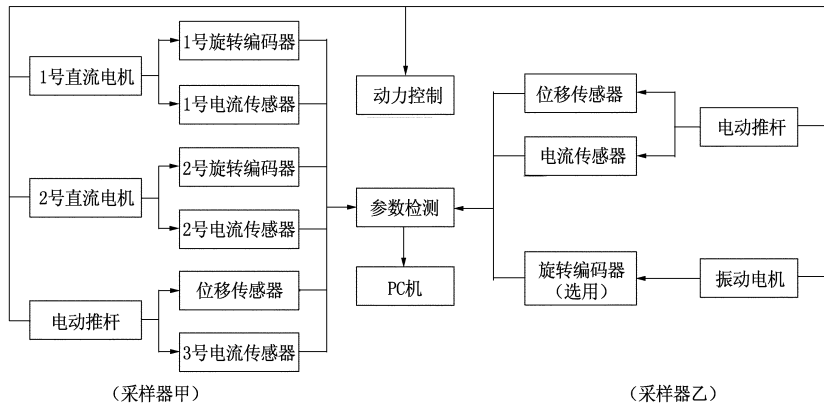


图7 模拟采样机具检测控制方案设计

灰黑,粒径分布较不均匀,其中夹杂有肉眼可见的2~4 mm 粒径的固体颗粒,总体松散呈粉末状,有一定的流动性;CUG_1.25 型模拟月壤整体颜色偏灰,类似水泥干粉,粒径较为均匀,无明显大颗粒,流动性极佳,在松散状态下晃动容器甚至能产生类似波浪的效果;CUG_0.50 型模拟月壤整体颜色偏白,颗粒粒径为3种模拟月壤中最小,在一定程度上与面粉类似,由于粒径小,密度小,其流动性为3种模拟月壤中最差。

为了最大程度的使用模拟月壤,设计试验中对3种模拟月壤分别进行了松散和压密人工处理,得到了6种不同的模拟月壤,经过测算该6种模拟月壤物理力学性质如表2所示。

表2 试验所用模拟月壤力学参数表						
月壤		容积密度 /(kg·m ⁻³)	孔隙度/%	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)	相对 密实度
CUG_0.50	松散状态	364	85	4.83	20.09	0
	密实状态	473	80.5	4.83	20.09	0.472
CUG_1.25	松散状态	1129	55.7	4.2	24.82	0.275
	密实状态	1286	49.5	4.2	24.82	0.910
CUG_1.50	松散状态	1799	37.5	1.68	26.39	0.914
	密实状态	1894	34.2	1.68	26.39	1

3 试验综述

3.1 试验方案设计

试验的基本目的在于获取机具在不同条件下运动过程中的受力及力矩情况,因此试验过程中可供改变的参数包括3类:

- (1)模拟月壤自身性质参数:通过6种模拟月壤之间的更换达到目的;
- (2)运动方式:通过在挖取、铲取、夹取和振动贯入4种动作之间切换达到;
- (3)运动参数:根据常规土力学的理论分析,在不同运动方式下影响机具受力情况的运动参数不一

样。挖取动作以挖取深度作为其主要运动参数,铲取动作以下铲位移及入土角度为主要运动参数,夹取动作以被夹质量为主要运动参数,振动贯入运动主要参数为是否开启振动、贯入速度及贯入位移。

综合上述分析,此次表层采样试验研究的主要试验方案如表3所示。

表3 模拟表层采样试验方案设计表			
运动方式	运动范围	可变试验参数	试验次数
挖取	旋转角度 [45°,180°] ^①	6种模拟月壤 3种挖取深度	6×3×3 ^② =54
铲取	下铲总位移70 mm 上扬终止角度180°	6种模拟月壤 5种下铲入土角度	6×5×3=90
夹取	旋转角度 [90°,180°]	5种被夹物体质量	5×3=15
振动贯入	贯入位移60 mm	6种模拟月壤 2种振动类型(开/关) 3种贯入速度	6×2×3×3=72

注:①以水平向右的方向为0°,顺时针方向转动为正向;②重复试验3次。

3.2 试验现象及试验结果

3.2.1 挖取试验

3.2.1.1 试验现象

挖取运动过程中,模拟月壤在竖直方向呈螺旋状进入上金属罩;上金属罩装满月壤后将排开运动轨迹前方模拟月壤;被排开模拟月壤首先在表面形成隆起,在达到一定高度后分别向两侧及前方崩塌;上金属罩完全脱离模拟月壤后形成一个与自身宽度一致弧形凹槽,凹槽最大深度即为设定挖取深度。

3.2.1.2 试验结果

由于相关要求,所有试验数据暂不能公示,在此仅进行定性的试验结果描述,后续3种试验相同。如图8所示,从试验结果曲线结合试验观察可得出上金属罩在整个挖取过程中承受扭矩分为4个阶段:

- (1)上金属罩尚未接触模拟月壤,检测扭矩在0

附近波动;

(2)上金属罩开始挖取模拟月壤,但尚未达到最大挖取深度,检测扭矩逐渐上升;

(3)上金属罩达到最大挖取深度后尚未脱离模拟月壤,检测扭矩逐渐下降;

(4)上金属罩完全脱离模拟月壤,检测扭矩在小范围内逐渐上升,整体趋于平缓。

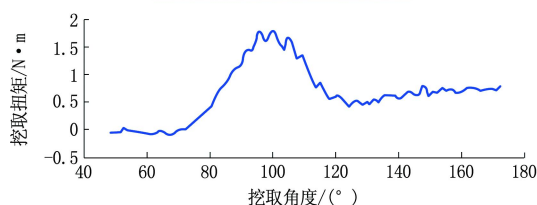


图8 挖取试验机具实物及检测扭矩曲线

3.2.2 铲取试验

3.2.2.1 试验现象

主体盒铲斗在下铲过程中无明显现象发生;上扬过程中已进入主体盒的模拟月壤由于胶结力的缺乏,在自重的影响下会出现滑动外泄;在铲斗完全脱离模拟月壤前,铲斗前端会推动前方模拟月壤,使之出现与挖取运动类似的隆起-崩塌现象;在铲斗完全脱离模拟月壤后,需及时关闭上金属罩,否则会继续出现模拟月壤滑出主体盒外泄的情况发生。

3.2.2.2 试验结果

如图9所示,试验过程中由于机具自重过大因此在铲入过程中产生振动,在铲入阻力曲线中能明显观察到机具振动对铲入阻力的影响;其次从趋势上看,铲入阻力随铲入位移的增大而增大。

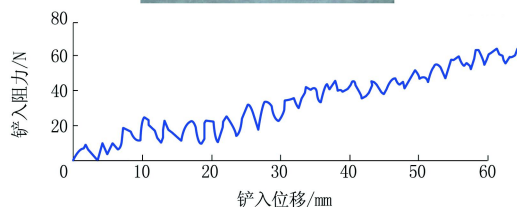


图9 铲取试验机具实物及铲入阻力曲线

3.2.3 夹取试验

3.2.3.1 试验现象

模拟月壤自身松散缺乏胶结,因此在夹取后移动时会出现明显的外泄,因此夹取运动不适合散体材料;对块状物体进行夹取时,只要块状物体能够被主体盒铲斗和上金属罩包纳,在不超出直流电机能力的情况下均能成功实现夹取运动;体积相对较大而上金属罩无法完全包纳的物体,利用上金属罩闭合的力量结合前端的摩擦力有一定的几率将其夹起。

3.2.3.2 试验结果

如图10所示,在夹取上金属罩和主体盒无法完全包纳的物体时,依靠上金属罩的闭合也能“咬住”物体。机具悬臂的扭矩随上扬角度的增大而增大,上扬过程中物体的突然滑动也会在扭矩曲线中明显的表现出来。

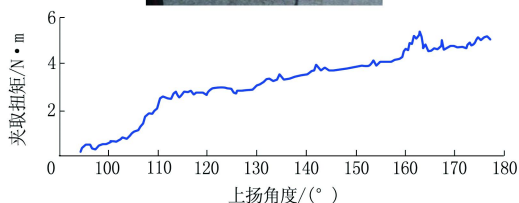


图10 夹取机具实物及夹取扭矩曲线

3.2.4 振动贯入试验

3.2.4.1 试验现象

模拟月壤的性质明显影响贯入阻力,在密实状态的模拟月壤中出现贯入机具自身重力不足而被顶起的情况,而松散状态的模拟月壤中无此现象;振动条件在一定程度上影响贯入阻力,在密实状态下模拟月壤中施加振动条件后机具被顶起的现象出现较晚,施加振动后;贯入过程中相对封闭的振动贯入筒中空气会沿模拟月壤缝隙向外喷出,此现象与贯入速度密切相关,贯入速度越快越明显;在机具完成贯入向外拔起的过程中有一定几率出现月壤滞留在振动贯入筒中的情况,类似钻探取心。

3.2.4.2 试验结果

如图11所示,在设定振动贯入位移范围内,振动贯入阻力随贯入位移的增大而增大。在不同的模拟月壤条件下,贯入阻力的峰值会发生明显变化;但在不同的贯入速度条件下,贯入阻力的峰值改变不大。

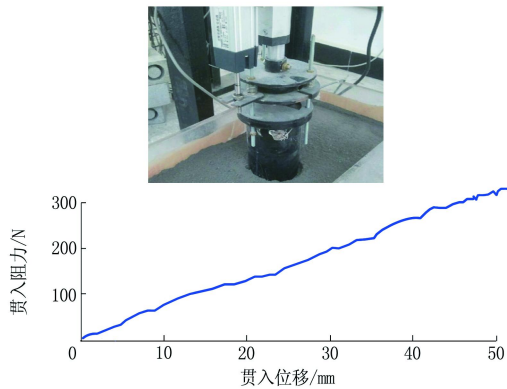


图 11 振动贯入机具实物及贯入阻力曲线

4 结论

完成基于模拟月壤的试验机具及其相关试验后,可得出以下结论。

(1)针对挖取、铲取、夹取和振动贯入4种动作设计的模拟月球表层采样机具在模拟月壤中能够正常的完成设计动作,并且采用电流传感器间接检测参数的方案也能正常运行。但机具在研发时需要考虑自重的影响,铲取动作中机具过大的自重已经影响到了最终参数的测量。

(2)通过改变模拟月壤类型,针对4种动作改变不同的运动参数,能够较为全面的获取不同条件下表层采样机具与模拟月壤的相互作用。

(3)通过对试验过程的观察可知,模拟月壤与常规沙土性质有一定的区别,能够观察到诸如振动贯入试验中向外喷射等非常规现象。

(4)通过对试验数据的分析可知,4种动作中除挖取外其余动作机具受力与其运动参数关系较为简单,近似呈线性关系,挖取动作随运动阶段不同其机具承受扭矩也有所改变。但所有的试验中改变模拟月壤的性质都会显著的影响检测得到的数据值,说明模拟月壤自身的性质对机具受力(力矩)影响很大。

参考文献:

- [1] 欧阳自远,邹永廖,李春来. 月球——人类走向深空的前哨战[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [2] 刘志全,庞彧,李新立. 深空探测自动采样机构的特点及应用[J]. 航天器工程,2011(03):120-125.
- [3] Bianciardi G, Miller J D, Straat P A, et al. Complexity Analysis of the Viking Labeled Release Experiments[J]. Int'l J. of Aeronautical & Space Sci,2012,13(1):14-26.
- [4] Anttila M E. Concept Evaluation of Mars Drilling and Sampling Instrument[D]. Holland: Helsinki University of Technology,2005.
- [5] Myrick T M, Bartlett P, Carlson L, et al. The RAT as a Mars rock Physical Properties Tool[J]. Space,2004;28-30.
- [6] Bao X, Bar-Cohen Y, Chang Z, et al. Modeling and Computer Simulation of Ultrasonic/Sonic Driller/Corer(USDC)[J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on,2003,50(9):1147-1160.
- [7] Craft J, Wilson J, Chu P, et al. Percussive Digging Systems for Planetary Research[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE,2010,25(10):21-26.
- [8] 李操,谢宗武,李永绍,等. 一种应用于月球样品采集、返回计划的末端执行器[J]. 机器人,2013,35(1):9-16.
- [9] 杨帅,董礼港,殷参,等. 导轨摆臂式表层月壤采样机构的研究[J]. 2012,10(4):43-48.
- [10] 卢伟,宋爱国,凌云. 卷簧式浅层月壤取样器设计及动力学分析[J]. 航天器工程,2011,20(4):86-92.

全国国土资源工作会议胜利闭幕

国土资源部门门户网站消息(2014-01-11) 2014年1月11日下午,全国国土资源工作会议第三次全体会议(闭幕会议)在北京召开。国土资源部部长、党组书记、国家土地总督察姜大明,副部长、党组副书记、国家土地副总督察徐德明,部党组成员、副部长汪民、张少农、王世元,部党组成员、中央纪委驻部纪检组组长王寿祥,部党组成员、副部长胡存智,部党组成员、国家土地副总督察张德霖,部党组成员、国家海洋局局长刘赐贵,部总工程师钟自然出席会议。

会上,部党组成员、副部长汪民作总结讲话,部党组成员、副部长胡存智主持会议。

汪民对本次会议给予充分肯定。他指出,这次会议以党的十八大和十八届二中、三中全会精神为指导,以学习领会和贯彻落实中央关于国土资源工作一系列重要指示精神为主线,以统一思想、凝聚共识为重点,深入分析形势,研究部署工作,以思想转变促进工作转变,主题鲜明,意义重大,影响深远,是在国土资源工作进入新时期召开的一次十分重要的会议。这次会议达到了统一思想、明确任务的目的,起到了相互交流、相互促进的作用,为2014年和今后一个时期的工作奠定了坚实的基础。

汪民强调,要准确把握好会议精神。他指出,“尽职尽责保护国土

资源、节约集约利用国土资源、尽心尽力维护群众权益”是当前和今后一个时期国土资源工作在大局中的定位,明确保护资源是首要职责,节约集约利用资源是核心任务,维护群众权益是我们工作的根本出发点和落脚点。这是国土资源工作的大局和要求。要切实把思想认识统一到中央精神和大明部长讲话要求上来,保持政治敏感性、坚定性和政治纪律的严肃性,坚守底线,改革创新。一是要深刻认识尽职尽责保护国土资源是历史担当,使命光荣,责任重大。二是要深刻把握节约集约利用国土资源是重大战略,功在当代,利在千秋。三是要深刻理解尽心尽力维护群众权益是根本宗旨,群众所望,工作所向。

最后,汪民指出,要发扬“钉钉子”精神,以踏石留印、抓铁有痕的劲头抓好会议精神的贯彻落实。一是要统一思想、凝聚共识。二是要敢于负责、勇于担当。三是要鼓舞士气、团结奋进。各省(区、市)及计划单列市国土资源主管部门主要负责人,新疆生产建设兵团国土资源局、各省会城市国土资源主管部门、解放军土地管理局主要负责人,国家海洋局、国家测绘地理信息局负责人,中国地质调查局领导班子成员,武警黄金指挥部负责人,国土资源部机关各司局、各派驻地方的国家土地督察局、其他直属单位主要负责人,以及中共中央组织部、国务院办公厅、国家审计署有关负责人参加会议。