

无轴螺旋式模拟月壤主动填充装置研制

马超¹, 刘飞¹, 曾婷², 赵曾², 庞勇², 樊明旭¹, 姜生元¹

(1. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150080; 2. 北京卫星制造厂, 北京 100190)

摘要: 针对月面综合钻进试验台模拟月壤利用率和试验效率低的问题, 提出一种主动送土试验台的设计方案, 满足月面钻采作业机具的取芯特性专项验证需求。该方案利用无轴螺旋作为模拟月壤垂直送入取芯机构, 采用集成料斗实现难流动物料连续送料的功能, 通过无轴螺旋转动主动将模拟月壤垂直送入取芯机构, 代替综合钻进试验台钻取月壤的作用, 可以实现多种级配模拟月壤的定量和定压输送。为了验证设计参数的正确性, 利用EDEM离散元分析模拟月壤输送特性, 并开展了试验验证。结果表明: 以无轴螺旋作为主动送土机构的核心单元, 可实现主动送土试验台自主、高效率地进行模拟月壤输送模拟多种取芯工况, 为工程部门钻采作业机具研制定型提供性能参数验证的依据。

关键词: 月面采样; 模拟月壤; 地面验证; 主动送土; 无轴螺旋

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)01-0057-06

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.01.009

引用格式: 马超, 刘飞, 曾婷, 等. 无轴螺旋式模拟月壤主动填充装置研制[J]. 深空探测学报, 2019, 6(1): 57-62.

Reference format: MA C, LIU F, ZENG T, et al. Development of platform for active filling lunar soil simulants[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(1): 57-62.

引言

原计划于2017年11月发射的“嫦娥5号”探测卫星携带月面钻采作业机具, 将通过钻取采样的方式获取月球表面深2 m、重500 g的月壤样品。这将是我国首次从地外天体实现无人自动采集星表样品, 实现返回的任务^[1]。由于着陆位置的不确定性和月壤物理力学特性的随机性, 对钻采作业机具的可靠性提出了非常高的要求, 需要在地面开展大量模拟月壤钻进试验。如何高效开展地面模拟钻进试验, 摸清钻采作业机具的能力包络和性能指标, 将成为任务成败的关键^[2]。

1 主动送土试验台方案设计

1.1 试验台功能分析

为了演练月面钻采作业流程, 模拟目标钻取月壤的等效性和覆盖性, 我国研制了月面综合钻进试验台, 如图1所示。该试验台由探测器模拟系统、钻采子系统和月壤模拟系统组成, 可以开展钻采全流程模拟, 适用于综合性钻采试验验证^[3-4]。但是, 模拟月壤利用率和试验效率较低, 不适用于装置级别的专项验证。

为了高效开展取芯性能试验验证, 本文提出了模拟月面采样主动送土试验台的设计方案, 拟研究利用

无轴螺旋传送原理, 将无轴螺旋输送装置作为该试验台主动送土机构的核心单元, 并通过离散元分析和有限元分析等方法, 以及模拟月壤输送试验等手段验证无轴螺旋的可靠性和可实施性。从图1~2两试验台的外形尺寸和功能组成对比可以看出, 同样开展取芯特性专项验证, 利用月面采样主动送土试验台操作方便, 并且可预见试验效率高、验证的取样工况更丰富、试验参数更易调整。

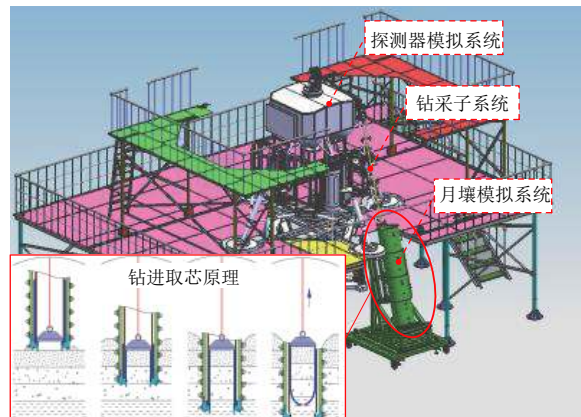


图1 综合钻进试验台

Fig. 1 Comprehensive drilling test platform



图2 月面采样主动送土试验台

Fig. 2 Test platform of active transporting lunar soil simulants

1.2 主动送土机构多方案设计

针对主动送土机构的功能需求，提出了直推式、有轴螺旋式和集成无轴螺旋式3种设计方案，详见图3~5，并对这3种方案的特点进行对比分析，详见表1。方案三集成无轴螺旋主动送土机构由于采用了无轴螺旋作为传送部件，对于物料的适应性强，解决了另两个方案输送卡滞的风险，并且料斗集成设计也避免了物料补给不及时产生空穴的问题，所以优先采用该方案。

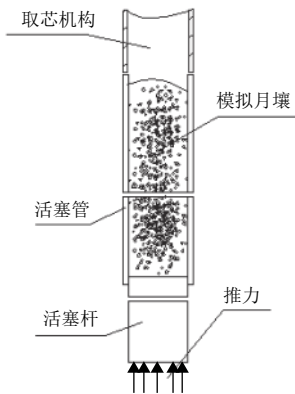


图3 直推式方案原理图

Fig. 3 Direct pushing transporting concept

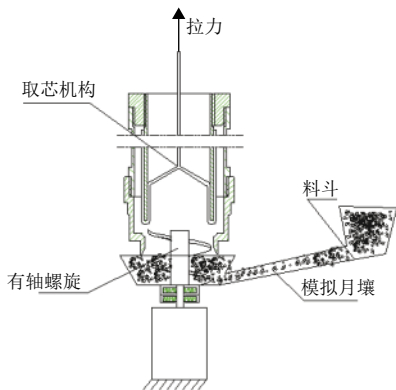


图4 有轴螺旋方案原理图

Fig. 4 Shaft screw transporting concept

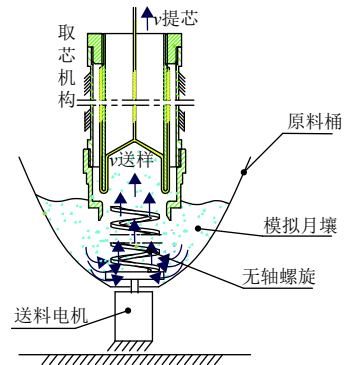


图5 集成无轴螺旋式方案原理图

Fig. 5 Integrated shaftless screw transporting concept

表1 主动送土机构多方案对照表

Table 1 Comparison of active transporting mechanisms

序号	名称	优点	缺点
方案一	直推式方案	结构简单，加工制造容易，成本低廉，模拟月壤需求量少。	活塞杆细长易弯曲变形，月壤压缩易形成力拱产生轴向阻力，导致月壤输送机卡滞。
方案二	有轴螺旋式方案	节省空间，避免大柔度杆的使用，提高工作效率。	料斗离槽较远，导致模拟月壤流动性较差，补给不及时容易产生空穴。
方案三	集成无轴螺旋式方案	月壤无需传送，无轴螺旋代替有轴螺旋，避免模拟月壤堆积缠绕。	无轴螺旋刚度弱，容易与侧壁产生刮蹭，影响使用寿命。

1.3 系统组成及工作原理

无轴螺旋式主动送土试验台由全参数钻进试验台、取芯机构和月壤输送机组成，如图6所示。月壤

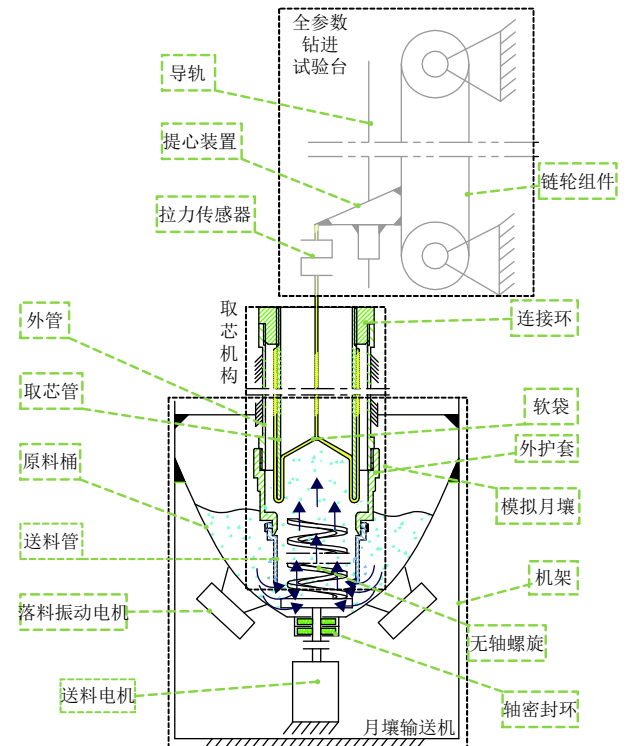


图6 模拟月面采样主动送土试验台工作原理图

Fig. 6 Test platform of active transporting lunar soil simulants

输送机是该试验台的核心, 由送料电机、轴密封环、无轴螺旋、机架、落料振动电机、送料管、原料桶、模拟月壤等组成。

在送料管区域的模拟月壤, 受无轴螺旋旋转和送料管内壁摩擦的作用, 将产生螺旋上升运动进入到取芯机构的软袋中。全参数钻进试验台中的提芯装置, 会根据给定运动参数控制软袋向上运动, 使得模拟月壤逐渐充满软袋, 实现取芯过程。考虑到在该试验中用到的模拟月壤为玄武岩颗粒^[5], 为了提高模拟月壤的流动性避免空穴导致供料不畅, 需要在原料桶的桶壁上安装两个振动电机, 能够辅助物料及时填充至输送通道。

2 无轴螺旋输土特性分析

2.1 无轴螺旋输送原理

无轴螺旋输送装置工作时, 螺旋高速旋转运动, 使物料颗粒受到较大的离心力, 物料颗粒与管壁之间产生摩擦力, 从而实现物料的向上运输, 无轴螺旋输送装置工作原理如图7所示^[6]。但只有摩擦力足够大时物料才能向上运动, 所以螺旋就需要有足够大速度以产生足够大的离心力(见图8)。

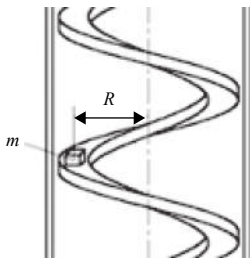


图7 无轴螺旋输送机工作原理图

Fig. 7 Working principle of shaft less screw mechanism

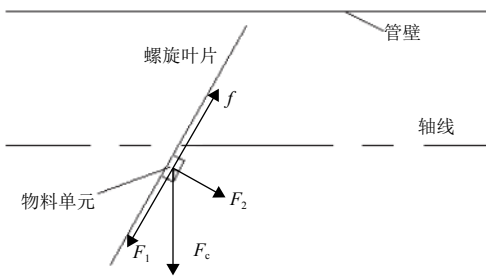


图8 物料单元受力分析图

Fig. 8 Force analysis of soil unit

2.2 无轴螺旋关键参数确定

作为月壤输送机的主要结构, 无轴螺旋的参数影响着物料的运动情况和受力情况, 对模拟月壤的输送效率有着很大的影响, 因此需要对无轴螺旋详细设计, 确定无轴螺旋的关键参数, 实现无轴螺旋输送效

率的最大化。根据相关文献, 无轴螺旋的直径应满足式(1)^[7]

$$D \geq K^{2.5} \sqrt{\frac{Q}{\varphi \rho C}} \quad (1)$$

其中: Q 为输送能力, 根据试验台的设计要求, 月壤流量为(0~25) g/min, 即0.15 t/h; K 为物料特性参数, 选取 $K = 0.5$; φ 为填充系数, 选取 $\varphi = 0.3$; C 为倾角系数, 选取 $C = 1.0$; ρ 为月壤容重, 选取模拟月壤容重 $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 。

经计算可知, 无轴螺旋外径只需大于4 mm就能够满足设计要求。由钻取采样结构正样件尺寸可知, 外护套下部内径为16 mm, 无轴螺旋外径应小于外护套内径, 为了较好的送土效果, 应该尽可能使无轴螺旋外径接近外护套内径, 故取无轴螺旋外径 $D = 15 \text{ mm}$, 并取螺旋内径 $d = 10 \text{ mm}$ 。

无轴螺旋的另一个重要的尺寸便是螺距 S 。螺旋直径一定时, 螺距的大小决定着螺旋升角, 影响物料的速度和受力分布情况, 对物料输送过程有较大的影响。根据相关文献的经验公式, 无轴螺旋的螺距如式(2)^[8]

$$S = \frac{D}{47AK^{2.5}} \quad (2)$$

其中: D 为无轴螺旋外径, $D = 15 \text{ mm}$; A 为物料综合特性系数, 取 $A = 30$; K 为物料特性系数, 取 $K = 0.05$;

计算得出 $S = 11.42 \text{ mm}$, 对螺距取整, 螺距较大时输送量较快, 所以取螺距 $S = 12 \text{ mm}$ 。

最终得到无轴螺旋的尺寸参数如表2所示。

表2 螺旋输送机构参数

Table 2 Screw mechanism parameters

mm			
螺旋外径	螺距	叶片厚度	螺旋长度
15	12	1	59

2.3 无轴螺旋离散元仿真分析

利用EDEM离散元软件对螺旋输送机构物料输送过程进行仿真分析, 为了仿真计算效率需要对螺旋输送机构模型进行简化, 简化后的装配图如图9所示^[9]。其中, 无轴螺旋的材料为65 Mn合金钢, 取芯管和原料桶的材料均为铝合金, 无轴螺旋的下部固定在一根短轴上, 短轴通过轴孔配合的方式与原料桶连接。

图10为模拟月壤输送过程的仿真过程, 可以看到模拟月壤在垂直输送过程中出现了分层现象, 即较大的颗粒分布在最上层。并且根据软件的设置, 模拟月

壤颗粒的颜色随着速度的增大而逐渐加深, 由图可以清晰地看到无轴螺旋附近的模拟月壤颗粒在做高速运动, 而其他位置的模拟月壤颗粒速度很小, 近乎为零, 该现象也符合客观规律。

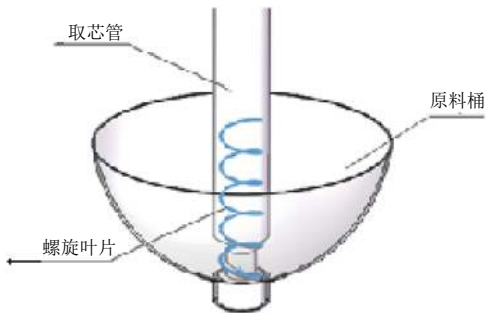


图9 螺旋输送机构简化模型
Fig. 9 Model of screw transporting mechanism



图10 模拟月壤输送的仿真过程
Fig. 10 Simulation of transporting lunar soil simulants

为了获得较高的输送效率, 在EDEM软件中0~2 000 r/min范围内, 每100 r/min为间隔设置了一个速度参数进行仿真。结果表明, 转速为1 700 r/min时输送土位移最快, 无轴螺旋受力变化情况如图11所示。

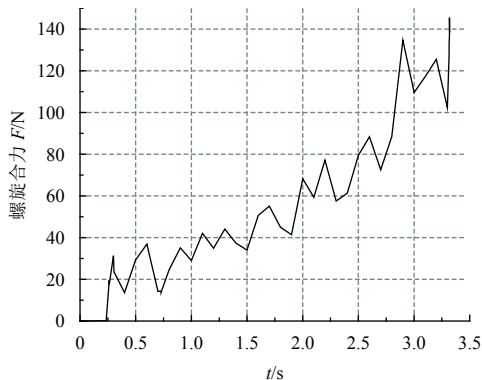


图11 无轴螺旋的受力变化情况
Fig. 11 Force changes of shaft less screw component

3 模拟月壤输送性能验证

试验中电机采用速度控制模式中的定速模式, 转速设置9个值, 经分析计算得到电机临界转速为218.5 r/min, 所以最小转速设220 r/min, 其余8组数据的电机转速从500 r/min开始, 依次增加500 r/min, 最高转速为1 900 r/min。在试验过程中测量送土高度、送土时间和送土质量等数据。

如图12所示, 在向上送土过程中, 模拟月壤出现了分层的现象, 粒径较大的颗粒分布在上层, 而粒径小的颗粒则分布在下层, 这与前文中EDEM离散元分析的现象相吻合。



图12 模拟月壤输送过程的分层现象
Fig. 12 Stratification during transporting

通过对试验数据的整理分析, 得到试验台的送土高度随电机转速的变化情况, 如图13所示。当电机转速为220 r/min时, 送土高度很小, 根据试验数据, 此时的送土高度只有5 mm, 验证了前文所述临界转速理论计算值的正确性。在试验转速范围内, 随着电机转速的增加, 送土高度呈现逐渐增长的趋势, 当电机转速达到1 700 r/min以后, 送土高度趋于稳定, 这表明电机转速达到1 700 r/min时, 送土效率已经达到最好状态, 这也与仿真结果相吻合。由试验数据经过计算可得送土速度和月壤流量随电机转速的变化情况如图14~15所示。

由图可知, 随着电机转速的增加, 送土速度和月壤流量均逐渐增加, 并最终趋于稳定。试验台取芯机构缠绕速度的范围要求为0~150 mm/min, 即送土速度需要达到150 mm/min, 由图14可知电机转速为1 100 r/min时, 送土速度可达200 r/min, 故试验台能满足该项技术指标。试验台月壤流量要求在0~25 g/min内, 由图15可知当转速为1 100 r/min, 月壤流量可达40 g/min, 故试验台能够满足该项技术指标。通过对试验台主要

的性能指标进行验证, 表明试验台的设计能够满足要求。

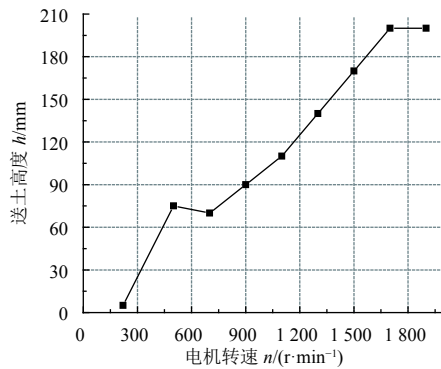


图 13 送土高度随电机转速的变化情况

Fig. 13 Lunar soil simulants height with motor rotation

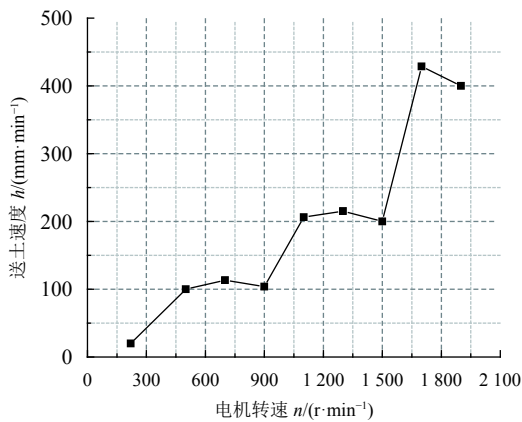


图 14 送土速度随电机转速的变化情况

Fig. 14 Transporting speed with motor rotation

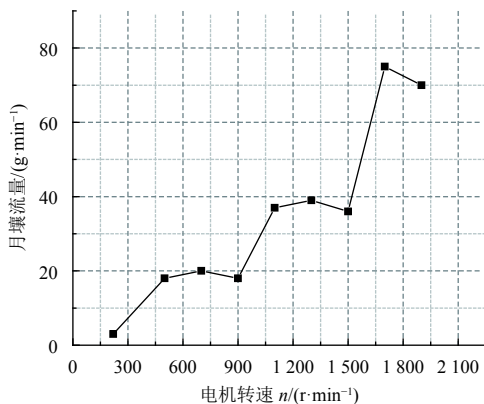


图 15 月壤流量随电机转速变化情况

Fig. 15 Lunar soil simulants flow with motor rotation

4 结束语

利用无轴螺旋传动原理研制了主动送土试验台。该试验台只需少量模拟月壤, 通过无轴螺旋输送装置

可将模拟月壤主动送入取芯管; 能够模拟多种取芯工况从而帮助改进正样产品取芯机构设计, 提高月面采样可靠性。通过详细设计、参数选定、仿真分析, 以及进行现场模拟月壤送土实验, 验证了无轴螺旋的可靠性, 大大提高了地面进行模拟月壤采样的试验效率。

参 考 文 献

- [1] 童曙泉. 嫦娥五号2017年采集月岩回地球[N]. 北京日报, 2013-12-17(013).
TONG S Q. Chang'e 5 lunar probe 2017 acquisition rocks back to Earth [N]. Beijing Daily, 2013-12-17(013).
- [2] 叶培建, 黄江川, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器发展历程和经验初探[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(6): 543-558.
YE P J, HUANG J C, SUN Z Z, et al. The process and experience in the development of Chinese lunar probe[J]. Sci Sin Tech, 2014, 44(6): 543-558.
- [3] 王清川. 钻取采样参数测试平台研制及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
WANG Q C. Development and experimental study of drilling & sampling test-bed [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [4] 吴淼. 月壤钻探取心机构性能测试系统研制及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
WU M. Development and experimental study of drilling & coring mechanism for lunar soil test system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [5] 郑永春, 欧阳自远, 王世杰, 等. 月壤的物理和机械性质[J]. 矿物岩石, 2004, 24(4): 14-19.
ZHENG Y C, OUYANG Z Y, WANG S J, et al. Physical and mechanical properties of lunar regolith[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24(4): 14-19.
- [6] 程路祥, 赵春晖, 王科. 无轴螺旋输送机[J]. 起重运输机械, 2016(8): 21-23.
CHENG L Y, ZHAO C H, WANG K. Shaftless screw conveyor[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2016(8): 21-23.
- [7] 张陈, 郭维城, 张凯, 等. 垂直螺旋输送机设计参数确定与优化[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2010.
ZHANG C, GUO W C, ZHANG K, et al. Preference and optimize of vertical screw conveyor[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Technology, 2010.
- [8] 张东海. 螺旋输送机的优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [9] 王国强, 郝万军, 王继新, 等. 离散单元法及其EDEM上的实践[M]. 西安: 西北工业大学, 2010.
WANG G Q, HAO W J, WANG W X, et al. Discrete element method and its practice on EDEM [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2010.

作者简介:

马超(1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 宇航空间机构及控制。

通信地址: 哈尔滨市南岗区一匡街2号2F栋(150080)

电话: (0451)86418082

E-mail: mc0125@qq.com

Development of Platform for Active Filling Lunar Soil Simulants

MA Chao¹, LIU Fei¹, ZENG Ting², ZHAO Zeng², PANG Yong², FAN Mingxu¹, JIANG Shengyuan¹

(1. State Key Laboratory for Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Beijing Spacecraft Manufacturing Factory, Beijing 100190, China)

Abstract: Aiming at the problem of lunar soil utilization and low test efficiency for the lunar surface integrated drilling test rig, a design scheme of the active soil feeding test rig is proposed to meet the special verification requirements of the coring characteristics of lunar drilling and mining equipment. The shaftless spiral is utilized as the core component of the simulated lunar soil transportation, and the integrated hopper is adopted to realize the continuous feeding of the difficult-to-flow material. The shaft-free spiral rotation is used to actively send the simulated lunar soil vertically into the coring mechanism instead of the integrated drilling test bench. By drilling the lunar soil, it is possible to realize quantitative and constant pressure transport of various grading simulations of lunar soil. In order to verify the correctness of the design parameters, EDEM discrete element analysis is used to simulate the characteristics of lunar soil transport, and experimental verification is carried out. The results show that the shaftless spiral can be used as the core unit of the active soil feeding mechanism, and the active soil feeding test bench can be used to simulate the lunar soil transport simulation of various coring conditions independently, and develop the drilling equipment for the engineering department.

Key words: lunar sampling; lunar soil simulants; ground-based validation; active transport; shaft less screw

High lights:

- A mechanical device is proposed which can vertically transmit simulated lunar soil for special verification of coring characteristics.
- The combination of the shaftless spiral and the integrated hopper can realize the reliable transmission of the multi-stage simulated lunar soil.
- Through the discrete element simulation and experiment, the relationship between the shaftless spiral speed and the transmission flow is explored.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]