

# 月壤剖面冲击贯入式探测方案研究

沈毅<sup>1</sup>, 王冬<sup>2</sup>, 姜生元<sup>1</sup>, 刘杰<sup>1</sup>, 张伟伟<sup>1</sup>, 陈化智<sup>1</sup>, 邓宗全<sup>1</sup>

(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 150001; 2. 北京卫星制造厂, 北京 100190)

**摘要:**以月壤剖面的原位探测为目标,提出一种利用土体结构侵彻原理的冲击式贯入器设计方案。重点阐述了冲击式贯入器的工作原理和机构实现方案,并开展多方案设计与分析。研制了原理样机并开展实验验证,证明利用冲击式贯入方法实现月壤剖面自动潜人的可行性,并对我国未来开展月壤剖面原位探测提出了相关建议。

**关键词:**月壤剖面; 侵彻; 原位探测; 冲击式贯入器

**中图分类号:** V11      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2095-7777(2015)03-0213-05

**DOI:**10.15982/j.issn.2095-7777.2015.03.004

## 0 引言

人类对月壤剖面的地质构成、地质演变过程、剖面特性及化学特性的探测兴趣越来越浓厚,原位探测的方式也多种多样。常规的原位探测通常利用钻取、表取等方式获得月壤剖面表层、次表层样品,并对所获取的样品进行分析,来研究其物理化学特性及其演化过程。近年来,以欧空局为代表的研究机构开展了依靠冲击式侵彻原理,进行星壤剖面特性探测的研究工作。这种新型原位探测方式,是利用搭载在探测器上的冲击式贯入器,在辅助装置配合下,利用土体结构的侵彻原理,使贯入器本体潜入到星球表面以下一定深度,利用贯入器本体上携带的传感器获取潜入位移、速度、加速度等动力参数,以及星壤剖面处的温度信息、星壤的化学成分等科学探测数据。贯入器再通过有线或无线方式将上述科学探测数据上传给探测器,由探测器传送到地球后,可实现星壤剖面的原位探测,为星表结构的研究提供科学证据<sup>[1-3]</sup>。

冲击式贯入器是指利用电能为动力资源,在一定周期内循环完成储能、释放、冲击动作过程,利用作用在贯入器本体上的冲击功或冲击动力,突破星壤的原态结构,使贯入器作用空间内的星壤相对密度发生变化,并对接触区内的星壤产生了“挤密效应”,实现潜入,本文简称冲击式贯入器为贯入器。利用这种贯入器完成对星壤剖面的自动潜入并开展原位探测,具有潜入深度不受探测器构型制约、体积

小、质量轻、功耗低及可实现长期探测等突出优势。

从2002年开始,哈尔滨工业大学宇航空间机构及控制研究中心密切跟踪国际前沿,开展了月壤剖面冲击式贯入器原位探测的预先研究工作,突破了贯入器本体与星壤相互作用力学机理研究、贯入器冲击机构优化设计等关键技术,研制了多种潜入原理样机,并开展了大量的实验验证工作。初步摸索出适合我国航天发展规划的贯入器探测系统方案和贯入器本体工程实现方案。本文重点介绍面向月壤剖面原位探测的冲击贯入式探测方案研究工作和未来应用构想。

## 1 冲击贯入式探测系统总体方案

依据贯入器原位探测的构想,参照国际先例,提出的冲击贯入式探测系统总体方案如图1所示,由贯入器辅助装置、科学系带、贯入器本体组成。贯入器在辅助装置配合下完成潜入工作,建立起潜入基本状态后,由电机驱动,通过一个特定的储能机构对冲击锤进行储能,储能到一定程度后突然释放冲击锤,冲击锤以一定的速度撞击贯入器本体,贯入器本体在这个冲击动力的作用下突破周围月壤结构的力学限制,循环工作,完成自动潜入。

在潜入的过程中,利用贯入器本体携带的各类传感器,实时采集并传输贯入器本体的位移、速度、加速度信息,依据已经标定好的潜入特性分析软件,可以反演出潜入路径处的月壤物理参数和力学参数;通过携带的其他传感器,可以获取探测点月壤的

化学成分、温度剖面等信息。从而实现较为精确的原位探测<sup>[4]</sup>,其中,科学系带具备为贯入器提供电能、传输科学探测数据的综合功能。

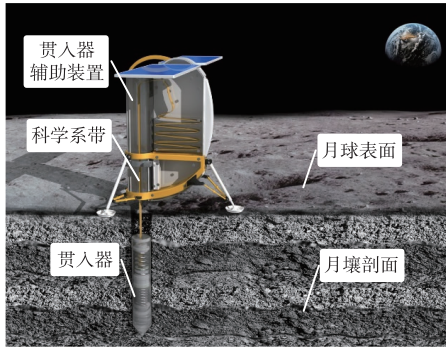


图 1 冲击贯入式月壤剖面探测系统组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the impact type lunar regolith detection system

## 2 贯入器实现方案设计

### 2.1 系统组成及工作原理

贯入器是实现潜水和开展探测的核心单元,实现自动潜水是首要功能。贯入器主要由贯入器本体、储能装置、冲击锤、侵彻头组成。其工作原理是:依靠贯入器本体内部的储能装置,对冲击锤进行储能,通过释放机构将冲击锤释放,冲击锤将以一定的速度和动量撞击贯入器本体,贯入器本体前端的侵彻头作用在月壤结构体上,完成一次侵彻作用,实现一次一定位移的潜入,依次循环,使贯入器下潜至月球表面一定深度。

根据储能方式的不同,贯入器可以分为机械储能和电储能两个类别。根据机构不同,初步可以将其划分为擒纵机构储能、凸轮机构储能及电磁储能三种类型。

### 2.2 擒纵机构储能方式贯入器

擒纵机构储能方式的贯入器主要由侵彻头、冲击锤、驱动单元、擒纵机构、外壳、储能弹簧及缓冲弹簧组成<sup>[5]</sup>,其组成结构如图 2 所示。

贯入器潜入过程工作原理如图 3 所示:(a)贯入器初始位置;(b)驱动单元正转,带动丝杠回转,使擒纵机构带动冲击锤向上移动,储能弹簧压缩并进行储能;(c)储能弹簧处于压缩变形最大处,此时储能弹簧压缩力处于擒纵机构释放临界状态;(d)擒纵机构与冲击锤分离,储能弹簧释放能量,冲击锤获得一定的速度,撞击侵彻头,使贯入器整体产生向下位移。此时,驱动单元及相关部件机构反弹并产生

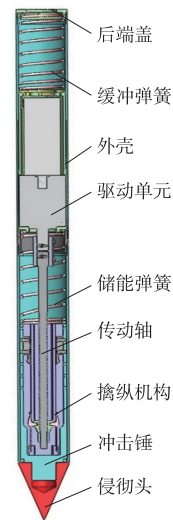


图 2 擒纵机构储能式贯入器本体组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the escapement mechanism storing energy penetrator

向上位移,缓冲弹簧受到压缩;(e)驱动单元开始反转,使擒纵机构向下移动;(f)擒纵机构与冲击锤结合,回到初始位置。之后,开始下一个循环。

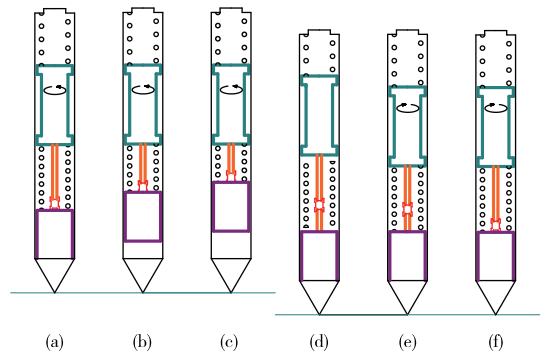


图 3 潜入过程示意图

Fig. 3 The overview of the penetration process

### 2.3 凸轮机构储能方式贯入器

凸轮机构储能方式的贯入器主要由侵彻头、冲击锤、驱动单元及电机组件、凸轮机构、外壳、储能弹簧及缓冲弹簧组成<sup>[6-7]</sup>,其结构组成如图 4 所示。

贯入器潜入过程工作原理如图 5 所示:(a)贯入器初始位置;(b)驱动单元通过传动轴带动滚子回转,使得凸轮产生轴向向上位移,储能弹簧受到压缩,L槽外壳与冲击锤之间有一定量的间隙,在缓冲弹簧的作用下,使L槽外壳内的凸轮—弹簧—电机整体结构向下移动,直到L槽外壳下缘与侵彻头上缘接触时,移动停止;(c)储能弹簧处于压缩变形最大处,此时为储能最大位置;(d)凸轮与滚子分离,储能弹簧释放能量,冲击锤撞击侵彻头,使贯入器整

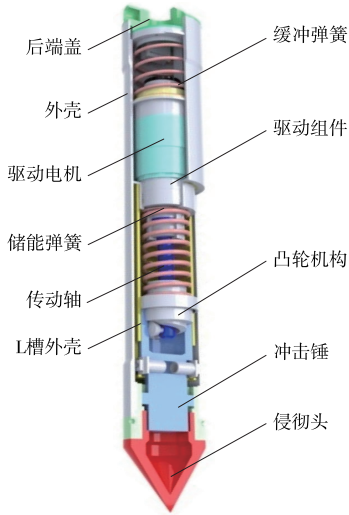


图 4 凸轮储能式贯入器本体组成图

Fig. 4 Schematic diagram of the cam mechanism storing energy penetrator

体产生向下位移;(e)L槽外壳带动电机凸轮等机构反弹,缓冲弹簧收到压缩,此时为缓冲弹簧压缩最大位置(f图所在位置),缓冲弹簧释放能量,使得L槽外壳、冲击锤复位,此时贯入器整体产生向下位移。之后,开始下一个循环。

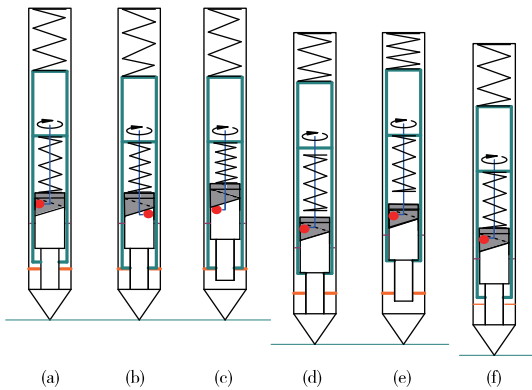


图 5 潜入过程示意图

Fig. 5 The overview of the penetration process

### 2.4 电磁储能方式贯入器

电磁储能方式的贯入器主要由侵彻头、冲击锤、电磁线圈、磁铁及缓冲弹簧组成,其结构组成如图 6 所示。

贯入器潜入过程工作原理如图 7 所示:(a)贯入器初始位置;(b)磁铁工作,侵彻头受到磁铁吸力并向上运动;(c)磁铁与侵彻头结合,线圈储能,准备释放能量;(d)线圈释放能量使冲击锤向下运动,冲击锤撞击侵彻头,使贯入器整体产生向下位移。之后,开始下一个潜入循环。

比较上述三种储能形式的贯入器,各自的潜入

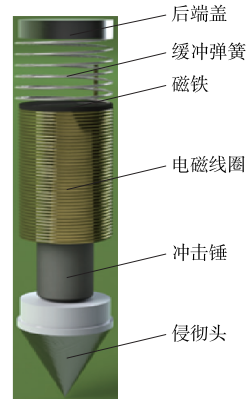


图 6 电磁储能式贯入器本体组成图

Fig. 6 Schematic diagram of the electromagnetism storing energy penetrator

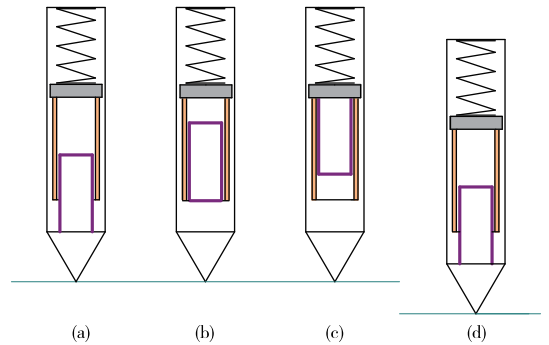


图 7 潜入过程示意图

Fig. 7 The overview of the penetration process

特点汇总分析见表 1。

表 1 贯入器方案对比分析表

Table 1 Comparing and analysis of the penetrator schemes

储能类型	特点
擒纵机构储能	驱动单元双向转动,储能行程长,冲击功大,适合于较大深度的潜入需求
凸轮机构储能	驱动单元单向转动,冲击频率高,冲击功稍小,可靠性较高
电磁储能	无需驱动单元,结构简单,冲击功较小,适合于较松软星壤的浅层潜入

三种类型各有特点,具体应用哪一种方案,可依据拟探测天体的星壤剖面物理和机械力学特性预示参数,以及拟开展的潜入探测科学目标来具体确定。

## 3 原理样机研制及实验研究

### 3.1 潜入特性实验台研制

为了分析贯入器潜入特性,需要开展侵彻头构型优化,冲击作用参数优化等基础研究工作。为此,开发了潜入特性实验台,实验台由侵彻头试验件、冲击锤、导向杆、冲击盘、模拟月壤桶等部分组成。实验台样机如图 8 所示。



图 8 潜入特性实验台

Fig. 8 The penetrating mechanism test bed

针对不同的模拟月壤潜入对象,利用该实验台,可完成变冲击功、变冲击频率、变侵彻头构型的对比实验,实现基于实验的贯入器优化设计与验证。该实验台的性能参数如表 2 所示。

表 2 潜入特性实验台参数表

Table 2 Parameters of the penetrating mechanism test bed

实验台参数	数值
整体尺寸/mm	1 350×650×1 600
套筒质量/kg	0.95
冲击功设置范围/J	0~8.5
潜入深度/mm	0~1 000
模拟月壤相对密实度	60%~100%
监测物理量	单次潜入位移、累积潜入深度
评估指标	侵彻头构型、冲击功传递效率、侵彻体影响域、模拟月壤颗粒流场和应力场

### 3.2 潜入过程的仿真分析与验证

利用离散元 EDEM 仿真软件,建立了模拟月壤本构模型以及不同侵彻头构型参数模型。以下潜过程中的潜入深度为观测目标,开展了模拟仿真,获得的仿真结果如图 9 所示。

仿真与实验结果为侵彻头的构型优化提供了依据。利用 EDEM 软件仿真分析贯入器的潜入特性,具有以下优势:

1)月壤剖面环境复杂,颗粒粒径从几微米至几毫米呈宽带分布。通过 EDEM 的模型创建模块,调整参数建立颗粒模型,高度模拟月壤类似物,且能够

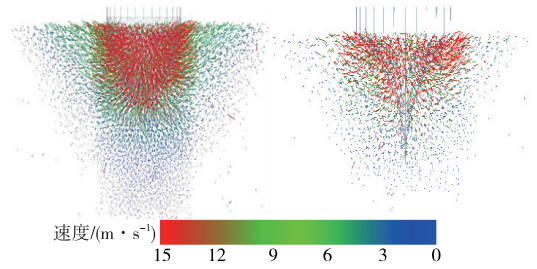


图 9 侵彻头与模拟月壤侵彻作用离散元仿真模型

Fig. 9 The EDEM model simulation of the penetrating effect between penetrator head and lunar soil

自行创建或由外部导入几何体。

2)EDEM 提供 API,用户可根据具体要求借助 C++ 语言编写程序插件定义接触模型、外部耦合和颗粒生成,从而控制几何体与颗粒的相互作用关系。

3)EDEM 具有强大的后处理功能,能够直观地观测到颗粒的流动以及贯入器与颗粒的相互作用特性,且能获得任意时间点处的数据。

### 3.3 原理样机研制

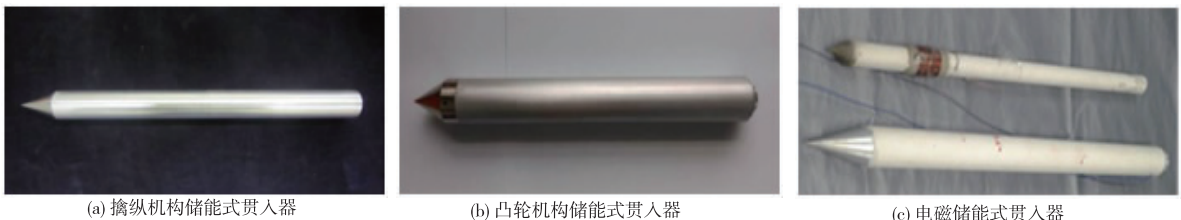
目前,本课题组研制了擒纵机构储能、凸轮机构储能、电磁储能三类贯入器原理样机,原理样机及其参数表分别如图 10 和表 3 所示。

表 3 贯入器原理样机参数表

Table 3 Parameters of the penetrating prototypes system

储能类型	擒纵机构储能	凸轮机构储能	电磁储能
研制年份	2011	2013	2012
电源功率/W	20	20	20
总体外径/mm	35	38	40
总长/mm	428	294	680
总质量/g	1 013	962	300
冲击锤质量/g	317	317	189
冲击行程/mm	50	12	—
输出扭矩/(N·m)	6	1.2	—
单次冲击功/J	6	0.58	0.4
电容/ $\mu\text{f}$	—	—	3 000
电压/V	—	—	450

对三种原理样机都开展了潜入验证实验,都能实现一定深度的潜入,从功能上证明了冲击式贯入器能够侵彻潜入月壤剖面,方案可行。为了进一步深化研究,还需进一步提升驱动单元的功率密度比,研制直径尺度更小的驱动和传动单元,以进一步缩



(a) 擒纵机构储能式贯入器

(b) 凸轮机构储能式贯入器

(c) 电磁储能式贯入器

图 10 贯入器原理样机

Fig. 10 The penetrating prototypes system

小冲击式贯入器的径向尺寸,提高单次冲击能力。此外,还需进一步改进试验观测条件,对侵彻潜入过程中冲击动力的传递特性、模拟月壤侵彻区颗粒流场和应力场的分布规律等进行精确量化研究。同时,为实现在侵彻潜入过程中的科学探测目标,还需要开展原态月壤剖面物理力学参数反演,月壤化学成分在线分析传感器的研制等工作。

## 4 结束语

冲击贯入式月壤剖面原位探测是月球探测的一种可行方式。这种方式可以利用较小的质量、较小的功耗,不依赖于探测器的尺度制约实现较大深度的侵彻潜入,并且能够实现原态月壤剖面的物理力学参数、月壤化学成分以及月表温度场分布等科学探测任务。相比于传统的钻探方式,具有突出优势,可在我国后续的月球探测、火星探测和小行星探测中移植应用。

针对我国未来拟开展的月壤剖面探测任务,提出以下建议:

1) 冲击式贯入器具有潜入深度不受探测器构型制约、质量小、功耗低、可实现长期探测等突出优势,以欧空局为代表的航天机构已经开展了近10年的预先研究,建议国家在开展重大工程规划中予以重视,并适时开展预先研究。

2) 冲击式贯入器的关键技术攻关工作,可借鉴土体结构侵彻、锚固等领域的知识体系,贯入器侵彻体与月壤间相互作用建模、侵彻头构型优化、冲击作用传递效率优化及高功率密度驱动部件等基础性

科学问题,是需要深化研究的主要方向。

## 参 考 文 献

- [1] Richter L, Coste P, Gromov V, et al. Development and testing of subsurface sampling devices for the Beagle 2 lander [J]. *Planetary and Space Science*, 2002,50(9):903-913.
- [2] Pullan D, Sims M R, Wright I P, et al. Beagle 2 the exobiological lander of mars express [J]. *ESA Special Publication*, 2004(1240):165-204.
- [3] Lorenz R D. Penetrators are not a panacea: historical review and critical[R]. [S. l.]: JHU Applied Physics Laboratory, 2010.
- [4] Gelmi R, Izzo M, Magnani P. Mole-carried sensor package [C]//Proc. 12th European Space Mechanisms and Tribology Symposium (ESMATs). [S. l.]: ESA SP-653, 2007:18.
- [5] Grygorczuk J, Seweryn K, Wawrzaszek R, et al. Technological features in the new mole penetrator kret[C]//Proceedings of the 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, ESMATs. Austria: [s. n.], 2009.
- [6] Stoker C, Gonzales A, Zavaleta J. Moon/mars underground mole[C]//Proc. 2007 NASA Science Technology Conf. USA: NASA, 2007.
- [7] Richter L, Kroemer O. Application of a remote controlled hammering drill from space to deep sea[J]. *OCEANS 2009-EUROPE*, 2009(11-14):1-4.

作者简介:

沈毅(1986—),男,博士研究生,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号哈工大科学园2F栋432室(3037信箱)

电话:(0451)86413857

E-mail:bhdxy2008@163.com

## Research on Impact Type Penetrator for Lunar Regolith Exploration Project

SHEN Yi<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>2</sup>, JIANG Shengyuan<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>,  
ZHANG Weiwei<sup>1</sup>, CHEN Huazhi<sup>1</sup>, DENG Zongquan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing Satellite Manufacture Factory, Beijing 100190, China)

**Abstract:** A design scheme of lunar surface impact type penetrator using the soil structure penetrating principle is put forward to realize in-situ investigation of lunar regolith, stressing its operating principle and mechanism and carrying out multi set scheme design and analysis. The prototype system is developed and demonstrated to prove the possibility of penetrating the lunar regolith. Some suggestions are also put forward for future in-situ investigation of lunar regolith.

**Key words:** lunar regolith; penetrator; in-situ investigation; impact type penetrator

[责任编辑:高莎]