

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205799

冲击挤密式月球表面钻探潜入器设计*

徐成^{1,2} 行芳仪^{2,3} 赵宝生¹

(1. 辽宁科技大学机械能与自动化学院 鞍山 114051; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人国家重点实验室 沈阳 110016; 3. 沈阳理工大学自动化与电气工程学院 沈阳 110158)

摘要: 为了提高冲击式潜入器的下潜效率, 利用质量-弹簧系统建立了潜入器单周期下潜过程的动力学方程, 通过遍历寻优的方式获得了潜入器高效下潜的最优质量刚度匹配关系, 基于 ADAMS 对潜入器工作过程中的运动状态进行了仿真研究, 在此基础上设计了一种高性能冲击挤密式月球表面钻探潜入器, 并制作了原理样机, 开展了潜入器下潜特性实验。实验结果表明, 相较于旧样机, 所设计的潜入器下潜效率提高了 63.7%, 且稳定性良好, 各部件运动工作协调, 实际下潜深度与理论和仿真结果基本一致, 具有较好的理论意义和重要的应用价值。

关键词: 潜入器; 动力学建模; ADAMS 仿真; 质量刚度匹配; 潜入实验

中图分类号: TH16; TN05 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.5099

Design of a penetrator for lunar surface drilling

Xu Cheng^{1,2} Xing Fangyi^{2,3} Zhao Baosheng¹(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;
2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Robotics, Shenyang 110016, China;
3. School of Automation & Electrical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110158, China)

Abstract: In order to improve the diving efficiency of the penetrator, this paper uses the mass-spring system to establish the dynamic equation of the single-cycle diving process of the penetrator, obtains the optimal mass stiffness matching relationship for the efficient diving of the penetrator through the ergodic optimization method, and simulates its motion state in the working process based on ADAMS. Based on this, a high-performance lunar surface penetrator prototype was designed and tested. The test results show that the penetration efficiency of the new prototype is 63.7% higher than the original one, and the stability is well. The motion of each component is coordinated, and the actual depth of the diving is in good agreement with theoretical and simulations, which is of good theoretical interest and important application value.

Keywords: penetrator; dynamic modeling; ADAMS simulation; mass and stiffness matching; penetration test

0 引言

嫦娥五号任务的圆满完成标志着我国进入月面探测新时代^[1-3]。其采用的月面钻探方案为多杆组接的旋转钻进式^[4], 该方案拥有技术成熟、效率高、能实现采样等优点, 但旋转钻进的过程很大程度上破坏了原位月壤的形态, 从而无法得到原始的月壤信息, 且钻具的体积、质

量、功耗等都较大^[5-6]。冲击挤密式潜入器凭借其体积小、质量轻、功耗低, 对原位月壤影响小且下潜过程中摩擦热小的优势^[7], 近年来成为了月球探测领域的研究热点, 其中潜入器的下潜效率与稳定性是学者们的研究重点。

国内哈尔滨工业大学的姜生元团队^[8-9]于 2013 年重点分析了冲击挤密式潜入器的下潜负载, 对冲击挤密式潜入器下潜过程进行了动力学建模, 制备了模拟月壤, 并

收稿日期: 2022-09-03 Received Date: 2022-09-03

* 基金项目: 国家自然科学基金(51775541)项目资助

研制了冲击挤密式潜入器样机。此外,中国科学院沈阳自动化研究所的刘金国团队^[10-11]对冲击挤密式潜入器的下潜特性,冲击挤密式潜入器质量刚度匹配及原理样机的研发也开展了大量的工作。

国外波兰科学院空间研究中心和德国宇航中心在该领域一直保持着行业领军水平^[12-15],先后研制了多款冲击挤密式潜入器样机,且开展了大量地面潜入实验,最具代表性的 HP3 凸轮式潜入器也于 2018 年 5 月搭载于“洞察号”飞往火星。然而在火星日的第一天就出现了无法下潜和潜入器发生倾斜的问题,德国宇航中心也于 2022 年在 HP3 任务失败分析报告中对这一问题进行了解释^[16],总结 HP3 任务失败的主要原因是潜入器的质量刚度匹配不够完善。

据上述冲击挤密式潜入器的研究现状可知,虽然前人已经对潜入器下潜过程进行了大量的研究,然而对于完整准确的动力学建模,潜入器高效下潜的最优质量刚度匹配等因素尚未进行全面的分析。完成月面原位钻探任务,需要研制一种高效的冲击挤密式潜入器,对潜入器下潜过程进行详细的动力学建模,并找到潜入器的最优质量刚度匹配,提高下潜效率。

为此,本文将利用分段建立动力学方程的办法,对潜入器单周期下潜过程进行深入分析,以潜入器单周期最大下潜深度为优化目标,通过遍历寻优的方法确定潜入器最优质量刚度匹配关系,结合仿真验证理论研究的正确性,设计并制作冲击挤密式潜入器的原理样机,最后开展地面潜入实验以验证其可行性。

1 月面潜入机理及下潜过程分析

1.1 潜入机理

根据美国 Apollo 任务带回的月面信息,月表以下有 4~15 m 的松散月壤,该月壤层相对密度较低,具有较好的可钻性。

冲击挤密式潜入器主要由冲击锤、壳体、抑制器、驱动弹簧和缓冲弹簧 5 部分组成。潜入器工作过程中,冲击锤被举升并压缩驱动弹簧,到达上止点后释放冲击锤,驱动弹簧储存的弹性势能转化为冲击锤的动能。随后潜入器各部件在驱动弹簧与缓冲弹簧的作用下发生两次碰撞,壳体克服月壤阻力并带动整个潜入器实现下潜。通过周期性的冲击,从而达到目标下潜深度。

1.2 下潜过程分析

为了防止潜入器作动过程中各部件发生运动干涉,需使用动力学方程对各部件的运动状态进行分析,从而为潜入器的设计提供参考。本文将潜入器下潜过程分为图 1 所示的 7 个阶段,并根据各部件在各阶段的状态,编

写动力学方程^[17],最终将 7 个阶段整合成潜入器单周期的下潜过程。

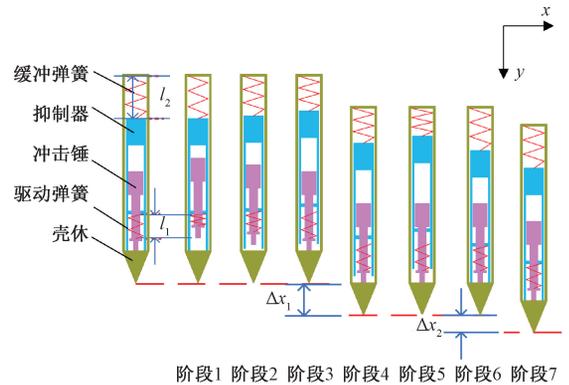


图 1 潜入器结构简图及下潜过程示意图

Fig. 1 Structure and diving process diagram of penetrator

为了简化计算的复杂性,提高计算效率,建立动力学方程前的几点假设:

- 1) 各部件都为刚体,碰撞形式为刚体碰撞;
- 2) 忽略潜入器内部各构件运动所产生的气流;
- 3) 忽略潜入器内部各构件之间的摩擦阻力;
- 4) 弹簧均为线性弹簧;
- 5) 碰撞所产生的能量损失采用能量恢复系数法;
- 6) 冲击锤在冲击后即保持与壳体一致的运动状态。

为方便各参数的表述,对动力学方程中各参数进行了简化。其中, m_0 为抑制器质量; m_1 为冲击锤质量; m_2 为壳体质量; k_0 为缓冲弹簧刚度; k_1 为驱动弹簧刚度; g 为月球重力加速度, μk 为壳体与月壤之间的静摩擦系数, μs 为壳体与月壤之间的动摩擦系数, N 为月壤对壳体侧壁的法向压力, e 为碰撞恢复系数, F_1 潜入器头锥所受轴向阻力; $x_0(t_2)$ 为抑制器在阶段 2 中的运动位移; $x_1(t_2)$ 为冲击锤在阶段 2 中的运动位移; $x_2(t_2)$ 为壳体在阶段 2 中的运动位移,以此类推。

阶段 1: 储能阶段,储能阶段电机驱动传动装置,冲击锤在 l_1 段被举升至预设的高度,此阶段仅冲击锤有位移,其余部件均处于静止状态。

阶段 2: 冲击锤释放阶段,冲击锤提升至预定高度后被释放,可能会出现 3 种情况:

1) 仅冲击锤发生位移,抑制器与壳体均未发生位移,所对应的动力学方程为:

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1(t_2) = -k_1 \cdot x_1(t_2) + m_1 \cdot g \quad (1)$$

2) 冲击锤与抑制器均发生位移,壳体未发生位移:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1(t_2) = -k_1 \cdot [x_1(t_2) - x_0(t_2)] + m_1 \cdot g \\ m_0 \cdot \ddot{x}_0(t_2) = k_1 \cdot [x_1(t_2) - x_0(t_2)] - k_0 \cdot x_0(t_2) + m_0 \cdot g \end{cases} \quad (2)$$

3) 冲击锤、抑制器与壳体均发生位移:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1(t_2) = -k_1 \cdot [x_1(t_2) - x_0(t_2)] + m_1 \cdot g \\ m_0 \cdot \ddot{x}_0(t_2) = k_1 \cdot [x_1(t_2) - x_0(t_2)] - \\ k_0 \cdot x_0(t_2) + m_0 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2(t_2) = k_0 \cdot [x_0(t_2) - x_2(t_2)] + \\ \mu_k \cdot N + m_2 \cdot g \end{cases} \quad (3)$$

阶段 3:碰撞阶段,冲击锤与壳体发生碰撞,两者发生动能传递。

$$\begin{cases} m_1 \cdot \dot{x}_1(t_2) + m_2 \cdot \dot{x}_2(t_2) = m_1 \cdot \dot{x}_1(t_3) + m_2 \cdot \dot{x}_2(t_3) \\ \dot{x}_2(t_3) - \dot{x}_1(t_3) = e \cdot (\dot{x}_1(t_2) - \dot{x}_2(t_2)) \end{cases} \quad (4)$$

阶段 4:第 1 次下潜阶段,壳体受冲击后被加速,突破月壤的阻力往 y 向位移 Δx_1 段距离后保持静止,抑制器仍往 $-y$ 向位移。

$$\begin{cases} m_0 \cdot \ddot{x}_0(t_4) = -k_0 \cdot [x_0(t_4) - x_2(t_4)] + m_0 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2(t_4) = k_0 \cdot [x_0(t_4) - x_2(t_4)] - \mu_s \cdot F_1 + m_2 \cdot g \end{cases} \quad (5)$$

阶段 5:抑制器缓冲阶段,壳体与冲击锤皆处于静止状态,抑制器受驱动弹簧的反冲力在 l_2 段往 $-y$ 向位移,缓冲弹簧则阻碍其该向位移,待抑制器沿 $-y$ 向的速度减速至零后,缓冲弹簧储存的弹性势能再转化为抑制器的动能,直至抑制器与壳体发生碰撞。该阶段会出现两种情况:

1) 仅抑制器发生位移

$$m_0 \cdot \ddot{x}_0(t_5) = -k_0 \cdot [x_0(t_5) - x_2(t_4)] + m_0 \cdot g \quad (6)$$

2) 抑制器与壳体都发生位移

$$\begin{cases} m_0 \cdot \ddot{x}_0(t_5) = -k_0 \cdot [x_0(t_5) - x_2(t_5)] + m_0 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2(t_5) = k_0 \cdot [x_0(t_5) - x_2(t_5)] + \mu_k \cdot N + m_2 \cdot g \end{cases} \quad (7)$$

阶段 6:二次碰撞阶段,抑制器被加速后与壳体发生碰撞,抑制器与壳体之间发生动能传递。

$$\begin{cases} m_0 \cdot \dot{x}_0(t_6) + m_2 \cdot \dot{x}_2(t_6) = m_0 \cdot \dot{x}_0(t_7) + m_2 \cdot \dot{x}_2(t_7) \\ \dot{x}_2(t_7) - \dot{x}_0(t_7) = e \cdot (\dot{x}_0(t_6) - \dot{x}_2(t_6)) \end{cases} \quad (8)$$

阶段 7:二次下潜阶段,壳体由于受到抑制器的撞击突破月壤的阻力向 y 向位移 Δx_2 段后恢复静止,潜入器整周期的运动完成。

$$(m_0 + m_2) \cdot \ddot{x}_2(t_7) = -\mu_s \cdot N - F_1 + (m_0 + m_2) \cdot g \quad (9)$$

至此完成了潜入器单周期下潜的动力学建模。

2 质量刚度参数寻优

由冲击挤密式潜入器的研究现状可知,质量刚度参

数匹配很大程度上影响着潜入器的下潜效率,合理的质量刚度匹配能使潜入器高效地下潜,然而不合理的质量刚度匹配不仅会使潜入器下潜效率降低,甚至会出现后退现象。

本文首先创建了质量刚度参数的可行域,使用 MATLAB 编写了各阶段子程序,再使用主程序串联各子程序。通过遍历可行域中创建的数据组^[18],依次计算出每组数据潜入器在设定的月壤阻力条件下所对应的下潜深度,最终筛选出最优参数,所建立的寻优系统框图如图 2 所示。根据朗肯土压力理论^[19],计算所得潜入器在 0.4 m 深度处所受的月壤阻力如表 1 所示。

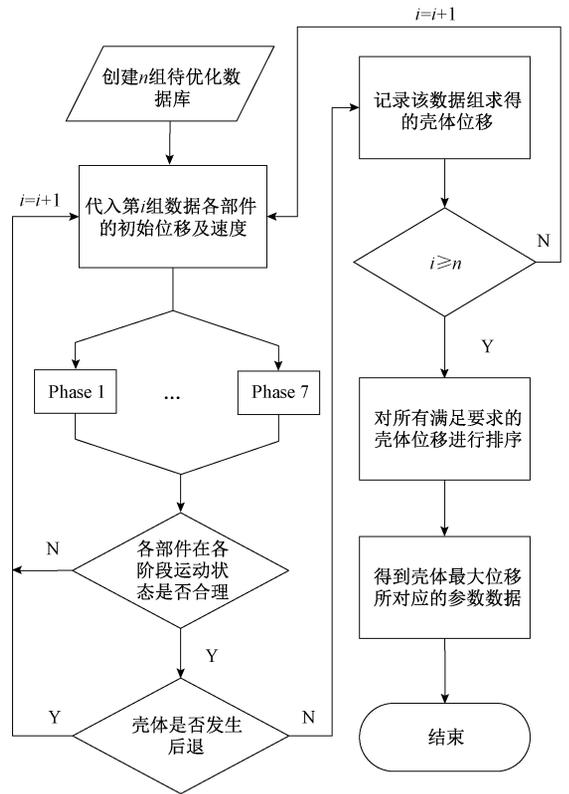


图 2 寻优系统框图

Fig. 2 Block diagram of optimization system

表 1 潜入器所受月壤阻力

Table 1 Resistance of lunar soil to the penetrator

参数	单位	数值
轴向阻力 F_1	N	170
侧壁摩擦阻力 f	N	10

根据冲击作动式潜入器的设计依据和约束条件要求^[10],创建的第 1 组寻优可行域如表 2 所示。设定质量取值步长 m_step 与刚度取值步长 k_step ,使用循环语句共创建了 5 184 组数据,这些数据经过程序的筛选,满足条件的共有 1 163 组。将筛选出的数据进行排序,得到

各组参数所对应的潜入器壳体位移如图 3 所示。

表 2 第 1 组可行域

Table 2 First group of feasible regions

参数名称	可行域
m_0	0.1~0.7 kg
m_1	0.1~0.7 kg
m_2	0.1~0.7 kg
k_0	500~8 500 N/m
k_1	500~8 500 N/m
m_step	0.2
k_step	1 000

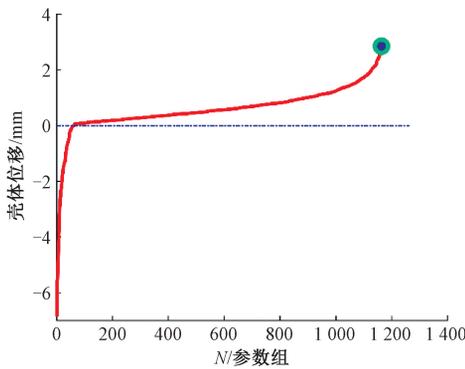


图 3 第 1 组可行域中满足条件的数据组所对应的壳体位移

Fig. 3 The shell displacement diagram corresponding to the first group of feasible regions

由图 3 可知,潜入器单周期下潜深度随质量刚度参数的取值变化较大,该组数据库中潜入器最优与最差参数如表 3 所示。

表 3 第 1 组可行域的最优与最差参数表

Table 3 Best and worst parameters of the first group

最优参数		最差参数	
m_0	0.7 kg	m_0	0.3 kg
m_1	0.1 kg	m_1	0.1 kg
m_2	0.1 kg	m_2	0.1 kg
k_0	500 N/m	k_0	4 500 N/m
k_1	8 500 N/m	k_1	8 500 N/m
下潜距离	2.86 mm	后退距离	6.85 mm

由表 3 可知,最优参数下,潜入器单周期下潜深度为 2.86 mm,而最差参数下,潜入器不能实现下潜动作,甚至后退了 6.85 mm,由此可见,质量刚度匹配对潜入器下潜能力的影响。

通过对第 1 组可行域的研究发现,可行域范围内, m_0, k_0 越大, m_1, m_2, k_0 越小,能经过寻优程序筛选的参数组越多。因此,为了验证第 1 组可行域所得最优参数的准确性,同时更清楚地揭示质量刚度参数对潜入效能的影响规律,针对性地缩小了各参数的取值区间,细化了取

值步长,设定 m_1 与 m_2 的取值步长为 m_step_1, m_0 的取值步长为 m_step_2 ,创建的第 2 组寻优可行域如表 4 所示。

表 4 第 2 组可行域

Table 4 Second group of feasible regions

参数	可行域
m_0	0.05~0.70 kg
m_1	0.05~0.10 kg
m_2	0.05~0.10 kg
k_0	500~2 500 N/m
k_1	500~8 500 N/m
m_step_1	0.01
m_step_2	0.05
k_step	1 000

第 2 组可行域共创建了 13 608 组参数,通过优化程序的筛选,最终满足条件的有 12 208 组参数。各参数组所对应的壳体位移如图 4 所示。

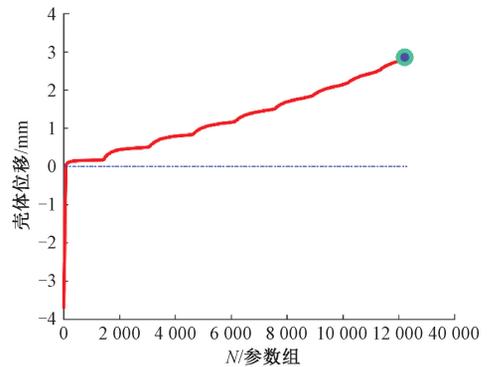


图 4 第 2 组可行域中满足条件的数据组所对应的壳体位移

Fig. 4 The shell displacement diagram corresponding to the second group of feasible regions

由图 4 可知,缩小取值区间和细化取值步长后,建立的数据组基本都能通过寻优程序的筛选,即潜入器各部件的质量刚度在此取值范围内较为合理。

该优化数据库中潜入器的最优参数与最差参数如表 5 所示。最优参数下,潜入器单周期下潜距离为 2.86 mm,最差参数下,潜入器单周期后退距离为 3.72 mm。由此可见,第 2 组可行域所得最优参数与第 1 组一致,验证了所得最优参数的准确性。

表 5 第 2 组可行域最优与最差参数表

Table 5 Best and worst parameters of the second group

最优参数		最差参数	
m_0	0.70 kg	m_0	0.10 kg
m_1	0.10 kg	m_1	0.05 kg
m_2	0.10 kg	m_2	0.05 kg
k_0	500 N/m	k_0	2 500 N/m
k_1	8 500 N/m	k_1	8 500 N/m
下潜距离	2.86 mm	后退距离	3.72 mm

通过对以上两组可行域的寻优对比研究,得出如下两点结论:

- 1) 可行域范围内,抑制器质量 m_0 、驱动弹簧刚度 k_1 的取值越接近最大值,越有利于潜入器的下潜;
- 2) 可行域范围内,冲击锤质量 m_1 、壳体质量 m_2 、缓冲弹簧刚度 k_0 的取值越接近最小值,越有利于潜入器的下潜。

值得注意的是,这些质量刚度参数亦不能一味的增加或减少,也需考虑实际工程实施的可能性。

综上所述,选定的潜入器最优质量刚度匹配参数为 $m_0=0.7\text{ kg}$ 、 $m_1=0.1\text{ kg}$ 、 $m_2=0.1\text{ kg}$ 、 $k_0=500\text{ N/m}$ 和 $k_1=8\ 500\text{ N/m}$ 。

3 仿真分析与验证

3.1 仿真模型建立

为了验证理论研究的合理性与正确性,借助 ADAMS 对潜入器单周期下潜过程中,各部件的运动状态进行分析^[20]。所建立的仿真模型如图 5 所示。

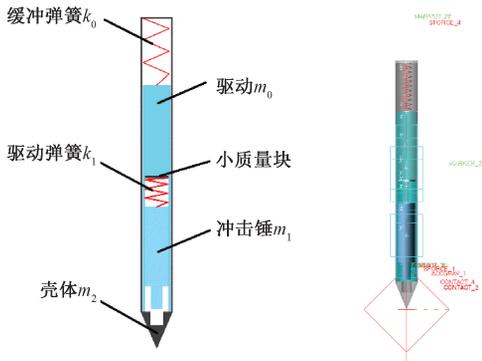


图 5 潜入器仿真模型

Fig. 5 Simulation model of the penetrator

与理论模型一致,为了保证研究的高效性,对该仿真模型做了如下几点假设:

- 1) 3 个质量单元都默认为刚体;
- 2) 忽略冲击锤与驱动在壳体内作动的摩擦阻力;
- 3) 忽略壳体内部件运动所产生的空气阻力;
- 4) 驱动弹簧与缓冲弹簧均为线性弹簧。

仿真模型中各部件的质量刚度参数均按第 2 节中求得的最优参数进行设置,潜入器下潜过程所受阻力的也与理论模型保持一致。

3.2 结果分析

图 6 为最优参数下,潜入器各部件的单周期理论与仿真位移求解。壳体理论求解的最大下潜深度为 2.86 mm,仿真求解的最大下潜深度为 3.03 mm,理论与仿真求解的误差为 5.9%,且该 3 部件位移在变化趋势上

理论与仿真基本一致,验证了理论模型的正确性。

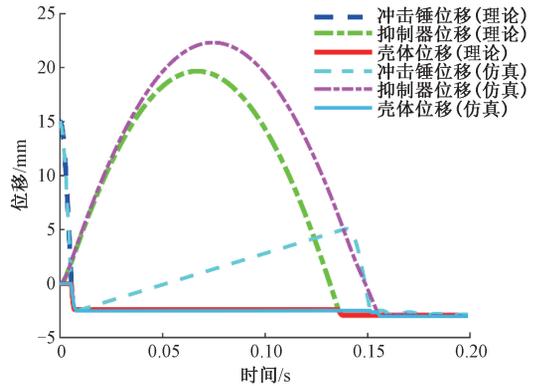


图 6 最优参数下各部件位移的理论仿真对比
Fig. 6 Comparison of theoretical and simulation solutions of displacement of each component under optimal parameters

新旧样机的设计如图 7 所示,新设计的样机结构更加合理、紧凑,且对关键零件进行了强化。新旧样机的质量和刚度参数如表 6 所示,相较旧样机,新样机在抑制器质量 m_0 、缓冲弹簧刚度 k_0 和驱动弹簧刚度 k_1 上有所增加,在冲击锤质量 m_1 和壳体质量 m_2 上有所降低。使用 ADAMS 对新旧样机的下潜性能进行仿真对比,所得各自的单周期下潜深度如图 8 所示。

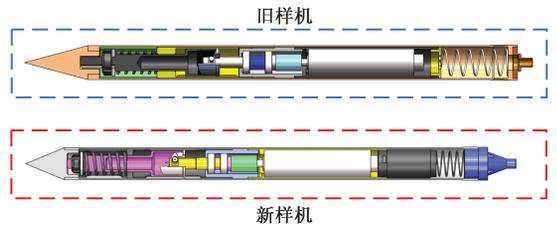


图 7 新旧样机的设计

Fig. 7 Design of the previous and new prototype

表 6 新旧样机质量刚度参数表

Table 6 The mass and stiffness parameters of the previous and new prototype

参数	旧样机	新样机
m_0	0.46 kg	0.70 kg
m_1	0.14 kg	0.10 kg
m_2	0.24 kg	0.10 kg
k_0	100 N/m	500 N/m
k_1	7 000 N/m	8 500 N/m

由图 8 可知,优化前壳体的最终下潜深度为 1.85 mm,优化后壳体的最终下潜深度为 3.03 mm,优化后潜入器下潜效率提高 63.7%,效果提升明显。

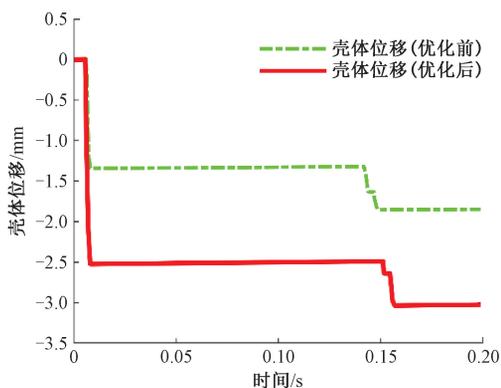


图 8 优化前后壳体下潜深度仿真对比
 Fig. 8 Simulation comparison of shell diving depth before and after optimization

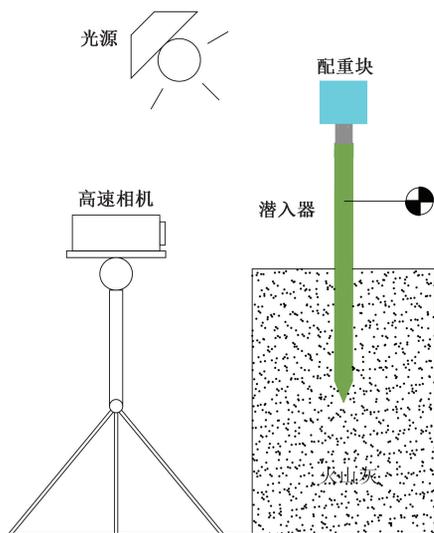


图 10 潜入器单周期下潜深度测试平台
 Fig. 10 Diving depth test platform

4 潜入器下潜特性实验

4.1 实验设计

理论与仿真研究的正确性,需实验进一步验证。本文根据寻优得到的最优质量刚度参数,制作了一套冲击挤密式潜入器原理样机,如图 9 所示。



图 9 冲击挤密式潜入器样机
 Fig. 9 Prototype of the penetrator

为了测量潜入器在不同下潜阻力下,壳体的单周期下潜深度,搭建了如图 10 所示的潜入器下潜深度测试平台。该测试平台主要由潜入器、高速相机、火山灰、光源和配重块 5 部分组成。

在潜入器后端加装质量与理论研究中潜入器所受轴向阻力大小一致的配重块,待潜入器稳定后撤去配重块,启动潜入器,使用高速相机捕捉潜入器壳体该周期的下潜深度。

4.2 实验结果

图 11 为潜入器单周期下潜深度的理论、仿真与实验结果对比图。壳体位移的实验结果为多次测试中重复性

较好的结果。由潜入器动力学建模可知,潜入器下潜分为两个阶段,第 1 阶段为冲击锤与壳体发生碰撞,第 2 阶段为抑制器与壳体发生碰撞,体现图 9 中为壳体的位移在宏观上发生了两次变化。第 1 次下潜深度的理论求解为 2.41 mm,仿真求解为 2.52 mm,实验测量结果为 2.25 mm。潜入器两次总下潜深度的理论求解为 2.86 mm,仿真求解为 3.03 mm,实验测量结果为 2.55 mm。

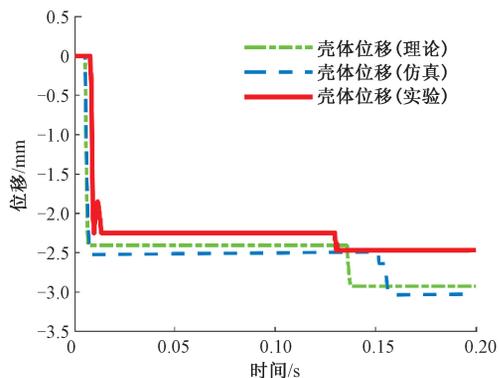


图 11 壳体单周期下潜深度理论、仿真与实验对比
 Fig. 11 Comparison of theory, simulation and experiment of single cycle diving depth of shell

下潜趋势方面三者基本一致,在下潜深度上存有些许差异的原因可能有 3 点:

- 1) 实际加工的质量与设计质量之间存在一定差异;
- 2) 理论与仿真模型中并未考虑壳体内部机构作动所产生的型腔空气阻力;
- 3) 潜入器作动时,内部机构之间会存在一定的摩擦

损失。

设计的样机在经过 10 000 余次冲击测试后仍能够保持良好的工作状态,且完成了多组极限下潜测试,具有较好的稳定性。

5 结 论

本文针对冲击挤密式潜入器下潜效率低的问题,对潜入器单周期的下潜过程进行了详细的分析,根据潜入器各部件在各阶段可能会出现的运动状态,分 7 个阶段建立了其下潜过程动力学方程,利用 MATLAB 编写了潜入器动力学求解程序。通过遍历寻优的方法找到了适合潜入器高效下潜的最佳质量刚度匹配参数。基于 ADAMS 对潜入器单周期下潜过程进行了仿真分析,结果表明所建立的动力学方程能较准确地分析潜入器的下潜过程,仿真与理论结果在数值上的误差被控制在 5.9%,各部件在运动趋势上基本一致。将优化质量刚度参数前后潜入器的下潜深度进行仿真对比,发现优化后的潜入器下潜深度提升了 63.7%,潜入效能提升明显。最终,根据寻优所得的最优参数,设计制作了冲击挤密式潜入器原理样机,开展了潜入器下潜特性实验,实验结果与理论仿真结果基本一致,且该实验的重复性较好,设计的样机工作稳定可靠,验证了该动力学模型与寻优算法的正确性,为冲击挤密式潜入器的设计研究提供了重要的参考。

参考文献

- [1] 李春来,刘建军,左维,等. 中国月球探测进展(2011—2020) [J]. 空间科学学报, 2022, 41(1): 68-75.
LI CH L, LIU J J, ZUO W, et al. Progress of China's lunar exploration (2011-2020) [J]. Chinese Journal of Space Science, 2021, 41(1): 68-75.
- [2] 刘建忠,欧阳自远,李春来,等. 中国月球探测进展(2001-2010) [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(5): 544-551.
LIU J ZH, OUYANG Z Y, LI CH L, et al. China national moon exploration progress (2001-2010) [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(5): 544-551.
- [3] 欧阳自远,李春来,邹永廖,等. 嫦娥一号的初步科学成果 [J]. 自然杂志, 2010, 32(5): 249-254, 266, 246, 315.
OUYANG Z Y, LI CH L, ZOU Y L, et al. The primary science results from the Chang'E-1 probe [J]. Chinese Journal of Nature, 2010, 32(5): 249-254, 266, 246, 315.
- [4] JIANG S Y, LIANG J N, LI X M. Analysis on drilling and coring process and lunar regolith stratification state interpretation in Chang'E-5 [J]. Journal of Mechanical

Engineering, 2022, 58(10): 349-360.

- [5] KHISINA N R, WIRTH R. Oriented chromite-diopside symplectic inclusions in olivine from lunar regolith delivered by "luna-24" mission [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2013, 104, 84-98.
- [6] BASILEVSKY A T, IVANOV B A, IVANOV A V. Clarification of sources of material returned by Luna24 spacecraft based on analysis of new images of the landing site taken by lunar reconnaissance orbiter [J]. Geochemistry International, 2013, 51(6), 510-528.
- [7] JAUMANN R, HIESINGER H, ANAND M, et al. Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: Status of current understanding [J]. Planetary and Space Science, 2012, 74: 15-41.
- [8] 秦艺伟. 冲击贯入式潜入器潜头构型参数优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
QIN Y W. Optimization of the shape and parameter for hammer-driven mole [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [9] 刘杰. 冲击式月壤剖面贯入器潜入负载特性研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
LIU J. Research on penetrating load characteristics of hammer-driven penetrator for lunar exploration [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [10] WANG M K, LIU J G, FENG J K, et al. Dynamics research and parameter optimization of planetary penetrators [J]. IEEE Access, 2019, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2923725.
- [11] 冯靖凯, 刘金国, 张飞宇. 仿树蜂三瓣式采样器研究 [J]. 机械设计与制造, 2018, A01: 147-149.
FENG J K, LIU J G, ZHANG F Y, et al. Research on bionic wood wasp sampler with three-valves structure [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2018, A01: 147-149.
- [12] SEWERYN K, GRYGORCZUK J, WAWRZASZEK R, et al. Low velocity penetrators (lvp) driven by hammering action - definition of the principle of operation based on numerical models and experimental tests [J]. Acta Astronautica, 2014, 99: 303-317.
- [13] LICHTENHELDT R, SCHÄFER B, KRÖMER O, et al. Hammering beneath the surface of Mars-modeling and simulation of the impact-driven locomotion of the HP3-mole by coupling enhanced multi-body dynamics and discrete element method [J]. Shaping the Future by Engineering: Ilmenau Scientific Colloquium (IWK), 2014.
- [14] JOSHUA, POGANSKI, NORBERT, et al. Extended pile driving model to predict the penetration of the Insight/

- HP3 mole into the martian soil [J]. Space Science Reviews, 2016, 211: 237.
- [15] SOPHN T, SEIFERLIN K, HAGERMANN A, et al. Mupus-A thermal and mechanical properties probe for the rosetta lander philae [J]. Space Science Reviews, 2007, 128(1-4): 339-362.
- [16] SPOHN T, HUDSON T L, WITTE L, et al. The InSight/HP3 mole on Mars: Lessons learned from attempts to penetrate to depth in the Martian soil [J]. 2021, DOI:10.48550/arXiv.2112.03234.
- [17] 付胜华, 韩秋实, 王红军, 等. 高速大行程滚珠丝杠副智能测控平台的伺服控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1821-1827.
- FU SH H, HAN Q SH, WANG H J, et al. Servo control of intelligent measurement and control platform for ball screw with high speed and large range [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1821-1827.
- [18] 张涵, 刘铁军, 刘波, 等. 遗传优化 PID 整定算法在阀门定位器中的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 215-222.
- ZHANG H, LIU T J, LIU B, et al. Application of PID tuning algorithm based on genetic optimization in valve positioner [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11): 215-222.
- [19] SHEN Y, HOU X Y, ZHANG K L, et al. Study on the

dynamic characteristics of a hammer-driven-type penetrators in the penetration process [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(3):1-11.

- [20] 谢最伟, 吴新跃. 基于 ADAMS 的碰撞仿真分析 [C]. 中国 CAE 工程分析技术年会, 2007:339-342.
- XIE Z W, WU X Y. Collision simulation analysis based on ADAMS [C]. China CAE Engineering Analysis Technology Annual Conference, 2007: 339-342.

作者简介



徐成, 辽宁科技大学硕士研究生, 主要研究方向为钻探机器人。

E-mail: Xucheng225600@126.com

Xu Cheng is a M. Sc. candidate in University of Science and Technology Liaoning. His main research interest includes

drilling robotics.



赵宝生 (通信作者), 辽宁科技大学教授, 主要研究方向为机械系统中力学问题研究、智能装备与技术开发。

E-mail: zhaobaos@pku.org.cn

Zhao Baosheng (Corresponding author) is a professor in University of Science and Technology Liaoning. His main research interests include research on mechanical problems in mechanical systems, and intelligent equipment and technology development.