

小型采样器浅层月壤铲挖阻力预测及铲挖参数优选

梁 磊, 赵志刚, 赵 阳
(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 研究了小型采样器在月表低气压低重力环境下对浅层月壤的铲挖阻力预测及参数优选问题。通过分析采样器铲斗—月壤间的相互作用,结合三轴试验仿真得出的月壤抗剪特性和弹塑性本构关系,分别对采样器的铲斗底面推移阻力和侧壁切削阻力进行了推导,实现了对月壤铲挖阻力的预测。在此基础上,以月壤铲挖阻力和收集速率为评价依据,针对0.2m深度以内的浅层月壤采样任务,利用自适应遗传算法确定了不同尺寸铲斗的最优铲挖参数。仿真结果表明,不同铲宽的月壤采样器均对应存在一个最优的铲挖深度和铲挖角,并且随着铲宽的增加,最优铲挖深度逐渐变大,最优铲挖角逐渐变小。

关键词: 浅层月壤; 铲挖阻力; 小型采样器; 自适应遗传算法; 多目标优化

中图分类号: V476.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2014)01-0039-08

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.01.005

Prediction of Lunar Regolith Excavation Resistance and Optimization of Excavation Parameters for Minitype Sampler

LIANG Lei, ZHAO Zhi-gang, ZHAO Yang
(Department of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Research on the minitype sampler's excavation resistance model of lunar regolith and the optimization of excavation parameters under low-gravity and low atmospheric pressure environment is conducted in this paper. The prediction model of lunar regolith excavation resistance is established, the soil cutting force and the soil penetration force are derived combined with the shear characteristics of lunar soil and its' elastic-plastic constitutive from the triaxial test simulation. On the basis of this model, for the purpose of lower resistance and higher collect ratio, optimal blade angle and blade depth in different bucket widths suitable for the lunar regolith sampling mission are determined by using the self-adapting genetic algorithm. The simulation results indicate that optimal blade angle and blade depth corresponding to different blade widths exist. With increase of the blade width, the optimal blade depth becomes larger, and the blade angle becomes smaller.

Key words: Lunar regolith; Excavation resistance; Minitype sampler; Self-adapting genetic algorithm; Multi-objective optimization

0 引 言

铲挖式月壤采样是对月探测活动中收集浅层月壤的重要手段。铲挖过程中,月壤对采样器存在阻力作用,其大小由月表重力、月壤力学特性和采样器

结构共同决定。

受探测器尺寸、铲挖驱动功率的影响,月壤采样器多采用小型化设计^[1]。为了高效、快速、低能耗地实现对月壤的收集,需要利用完善的铲挖阻力解析模型,对小型采样器的铲挖参数进行优化设计。

各国学者对铲挖阻力模型进行了大量的研究和试验,从土壤失效、颗粒流等不同方面对土壤挖掘阻力进行了细致分析。1964年,Osman M等人提出曲线失效面的概念,建立了Osman模型^[2],该模型精度较早期广泛使用的直线失效面模型提高很多;Gill/Vanden Berg模型^[3]在前者基础上添加了土壤惯性力与内聚力,同时对机-土摩擦力进行了简化;Swick/Perumpral模型^[4]与McKyes模型^[5],又分别针对二维推土板与土壤的切割过程,给出了铲挖阻力的不同数学表达式;Lockheed-Martin/Viking模型^[6],针对斗轮式挖掘装置,提出了铲挖阻力与铲挖速度之间的非二次方关系的铲挖阻力方程。上述五种模型采用二维简化模型分析了其铲挖阻力。为考虑铲斗侧壁在铲挖过程中的切割和摩擦效应,一些学者也建立了三维铲挖阻力经验模型,典型代表有以下两种:(1) Hemami模型^[7],将铲挖阻力分为斗内土壤重力、土壤压缩阻力、机-土滑移摩擦、推移切割阻力、土壤移动惯性力、铲挖斗移动惯性力等六种分力;(2) Balovnev模型^[8],在前者基础上将公式中的推移切割阻力进行了进一步细化。

但是,由于成因及所处环境不同,月壤的力学性质与地面土壤存在较大的差异,导致传统的地面铲挖模型无法直接用于预测月壤的铲挖阻力。同时,对于目前研究月壤-机构交互作用中常采用的数值分析方法^[9-10],由于计算量极大,也较难用于开展参数优化工作。因此,本文利用与真实月壤应力-应变试验结果相吻合的浅层月壤离散元模型,对月表环境下的月壤抗剪强度和弹塑性本构参数进行了分析,并将分析结果引入到基于McKyes模型和Kostritsyn公式的铲挖阻力模型中,建立了浅层月壤铲挖阻力预测模型。在此基础上,针对深空探测器机构小型化、轻量化的设计需求^[11],本文基于预测模型对小型浅层月壤采样器的铲挖参数关系进行了研究,在综合考虑月壤铲挖阻力和收集速率的条件下,利用自适应遗传算法^[12]对不同铲宽参数下的最优铲挖角和最优铲挖深度进行了计算。

1 月壤力学性质研究

1.1 月壤抗剪特性

基于线刚度颗粒接触理论^[13]定义月壤散体颗

粒,利用文献[14]中的月壤离散元细观参数,建立月壤离散元模型。

表1 月壤离散元细观参数

Table 1 Meso-parameters of discrete element model of lunar soil

细观参数名称	参数值
颗粒密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	2900
杨氏模量 E / MPa	42.5
泊松比 ν	0.39
摩擦系数 μ_p	0.75
颗粒半径 R / mm	0.5 ~ 1.25
黏滞阻尼系数 D	0.84

根据表1建立轴向长度12mm,宽度和高度均为6mm的月壤离散元模型,定义月表重力加速度 $g = 1.63 \text{m/s}^2$,设置围压 σ_w 并对月壤模型施加轴向应力,开展微型静三轴试验仿真。

由于月表无大气,且所铲挖月壤均为浅层预应力较小的月壤,故 σ_w 较低。分别设计 σ_w 为35kPa、50kPa、65kPa、80kPa和95kPa共5种工况,对各工况下的月壤模型开展三轴压缩试验。保持轴向应变速率为0.003%/min,仿真结果如图1所示。

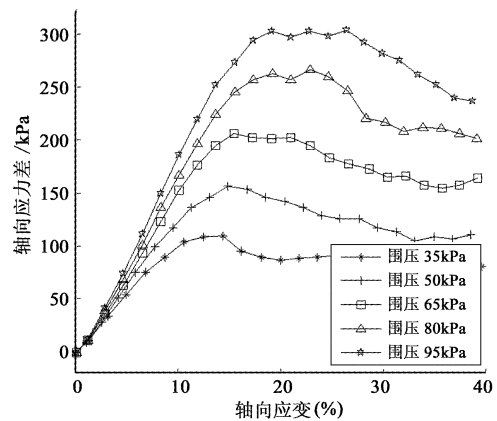


图1 月表环境下的月壤应力-应变关系

Fig. 1 Stress-strain relationship of lunar regolith on lunar surface environment

对上述5种围压下的月壤应力-应变曲线进行分析,利用月壤发生剪切破坏时的大、小主应力,基于莫尔-库仑强度理论计算月表环境下的浅层月壤抗剪强度如表2所示。

1.2 月壤泊松比

在月壤三轴压缩试验中,定义 ε_v 为月壤体应变, ε_z 、 ε_{w1} 和 ε_{w2} 分别为月壤轴向应变和两个横向应

表 2 月表环境下的浅层月壤抗剪强度
Table 2 Shear strength of lunar regolith on lunar surface environment

抗剪强度参数	计算结果
内聚力 c /kPa	0.5142
内摩擦角 φ /($^\circ$)	39.736

变,有

$$\varepsilon_V = \varepsilon_z + \varepsilon_{w1} + \varepsilon_{w2} \quad (1)$$

由于三轴试验中 ε_{w1} 和 ε_{w2} 基本相等,定义 ν 为月壤泊松比,于是有

$$\nu = -\frac{\varepsilon_V - \varepsilon_z}{2\varepsilon_z} \quad (2)$$

利用图 1 所示 5 种围压下的月壤应力—应变曲线对 ν 进行计算。将月壤初始压缩阶段,即轴向应变 $\varepsilon_z = 0.5\%$ 时的 ε_V 代入式(2)中,并对所有工况的计算结果取平均值,得月壤泊松比 $\nu = 0.549$ 。

1.3 月壤弹塑性本构

月壤具有弹塑性,其本构关系可通过一系列具有不同屈服极限的弹簧元件和摩擦元件所组成的 Iwan 机械模型进行描述^[15],如图 2 所示。

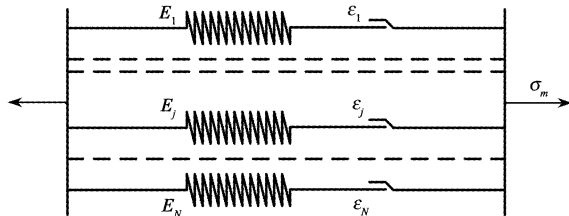


图 2 并联式 Iwan 模型
Fig.2 Parallel Iwan model

定义 N 为弹塑性元件总数, E_j 为元件 j 的弹性模量, ε_j 为元件 j 的屈服应变。对各弹塑性元件按屈服应变值的大小顺序递增排列,定义 σ_m 为月壤所受应力,当 σ_m 的加载作用导致月壤产生应变 ε_m 时,有

$$\sigma_m = \sum_{j=1}^m \varepsilon_j E_j + \varepsilon_m \sum_{j=m+1}^N E_j \quad (3)$$

式中: m 为月壤所受应力为 σ_m 时,发生屈服的弹塑性元件数量, $m \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。

在一定的应变范围内布置 N 个弹塑性元件。上述 N 个元件各自的屈服应变取值均匀分布在设定的月壤应变范围内并逐个递增。根据式(3),分别建立 m 为 1 到 N 时的月壤弹塑性本构模型并联立,有

$$\boldsymbol{\sigma} = (\boldsymbol{\varepsilon}_p + \boldsymbol{\varepsilon}_e) \boldsymbol{E} \quad (4)$$

式中: 应力阵 $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N]^T$, 弹性模量阵 $\boldsymbol{E} = [E_1, E_2, \dots, E_N]^T$, $\boldsymbol{\varepsilon}_p$ 为塑性应变阵, $\boldsymbol{\varepsilon}_e$ 为弹性应变阵。 $\boldsymbol{\varepsilon}_p$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_e$ 如式(5)、式(6)所示。

$$\boldsymbol{\varepsilon}_p = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & & & & \\ \varepsilon_1 & \varepsilon_2 & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \\ \varepsilon_1 & \varepsilon_2 & \dots & \dots & \varepsilon_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_e = \begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_1 & \varepsilon_1 & \dots & \varepsilon_1 \\ & 0 & \varepsilon_2 & \dots & \varepsilon_2 \\ & & 0 & \ddots & \vdots \\ & & & \ddots & \varepsilon_{N-1} \\ & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

采用动三轴试验方法确定各应力阵 $\boldsymbol{\sigma}$, 进而实现对弹性模量阵 \boldsymbol{E} 的求解。以 1.1 节中月壤模型为仿真试验样本,保持围压 30kPa,并对月壤施加轴向应力,开展微型动三轴试验仿真。设计施加在月壤轴向的正弦型应力为 σ_f , 有

$$\sigma_f(t) = A \sin(2\pi t/T) + \sigma_d \quad (7)$$

式中: σ_d 为偏压固结轴向应力, T 为应力周期, A 为应力幅值。

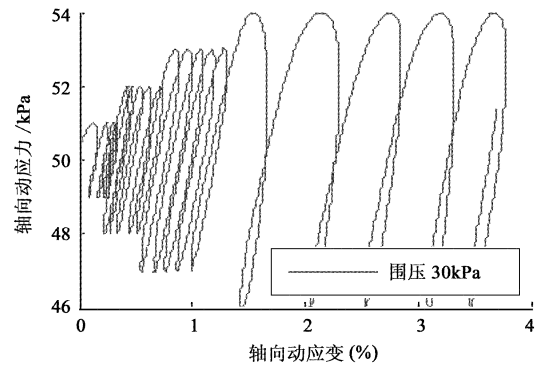


图 3 月表环境下的浅层月壤动应力—动应变关系
Fig.3 Dynamic stress-strain curve of lunar regolith

对月壤施加 $\sigma_d = 50\text{kPa}$ 的偏向固结压力,轴向动应力 σ_f 周期 T 为 50s。加载过程分为 4 级,每级各加载 5 个周期,各级幅值 A 分别为 1kPa、2kPa、3kPa、4kPa。仿真结果如图 3 所示。

根据图 3 仿真结果,移除月壤动三轴应变累积值,并定义 σ_f 各级第 3 周期的动应力—动应变曲线为参考回滞圈,根据各回滞圈顶点的动应力和动应变幅值,绘制月壤骨干曲线如图 4 所示。

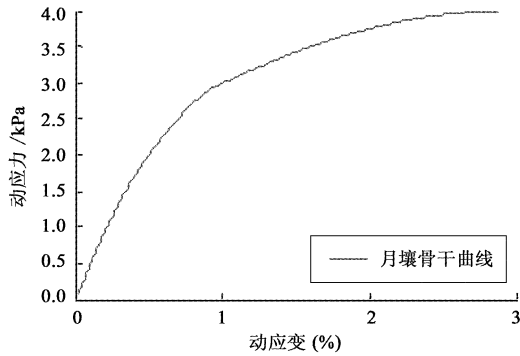


图 4 月表环境下的月壤骨干曲线

Fig. 4 Backbone curve of lunar regolith on lunar surface environment

根据图 4 的月壤骨干曲线, 定义弹塑性元件总数 $N = 14$, 分别对 14 个元件的屈服应力 σ 进行计算, 并将其代入到式(4)中, 求解得浅层月壤弹塑性模型的弹性模量阵 \mathbf{E} 如表 3 所示。

表 3 月表环境下的月壤弹塑性本构参数

Table 3 Parameters of elastic-plastic constitutive of lunar regolith

元件编号	屈服应变 ε_j (%)	动应力 σ_j /kPa	弹性模量 E_j /kPa
1	0.1	0.4915	0.5852
2	0.3	1.3575	1.0634
3	0.5	2.0108	0.7736
4	0.7	2.5094	0.6486
5	0.9	2.8783	0.8146
6	1.1	3.0843	0.1502
7	1.3	3.2602	0.0769
8	1.5	3.4207	0.0846
9	1.7	3.5644	0.0922
10	1.9	3.6895	0.0999
11	2.1	3.7947	0.1076
12	2.3	3.8784	0.1152
13	2.5	3.9391	0.1229
14	2.7	3.9751	0.1803

将 \mathbf{E} 代入式(3)中, 定义 y 为月壤正应变, 当 y 为加载特性时, 有月壤正应力

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{I}(\mathbf{E}, y) = [\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_m, y, \dots, y] \mathbf{E} \quad (8)$$

式中: $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_m$ 为应变小于 y 的弹塑性元件屈服应变。

同理, 定义 ζ 为剪应变, 将月壤泊松比 ν 代入式(8)中, 得月壤剪应力 τ , 有

$$\tau = \mathbf{I}(\mathbf{G}, \zeta) = \mathbf{I}\left(\frac{\mathbf{E}}{2(1+\nu)}, \zeta\right) \quad (9)$$

2 月壤铲挖阻力预测模型

2.1 铲挖阻力分析

受月壤重力、月壤抗剪强度和机—土摩擦作用的影响, 采样器铲斗在工作过程中会存在铲挖阻力。如图 5 所示, 月壤铲挖阻力由铲斗侧壁切削阻力 F 和底面推移阻力 T 组成。设计铲斗牵引速度方向保持水平, 铲挖全过程中, 铲斗底面与水平面保持铲挖角 β 并沿牵引方向对月壤产生推移作用; 铲斗侧壁在铲挖全程与水平面保持垂直并沿牵引方向对月壤进行纯切削。

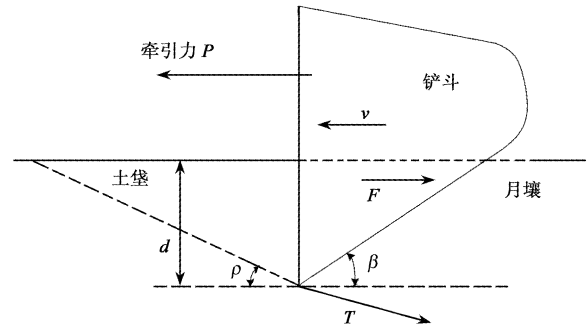


图 5 采样铲斗铲挖过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of excavation process of bucket

定义月壤水平铲挖阻力为 R_H , 建立月壤铲挖阻力预测模型有

$$R_H = T \sin(\beta + \delta) + 2F \quad (10)$$

式中: δ 为机—土摩擦角。

2.2 底面推移阻力

分析月壤铲挖时的底面推移阻力 T 。采样器铲斗的底面前方月壤在推移作用下会形成月壤土堡, 底面推移阻力 T 即由土堡重力、土堡—原位月壤间的抗剪作用、土堡—铲斗底面摩擦力和土堡惯性力共同作用而成。基于 McKyes 机—土静力平衡方程^[5] 建立采样器铲斗底面推移阻力模型, 有

$$\begin{cases} T = w(\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + \gamma v^2 d N_a) \\ N_\gamma = 0.5(\cot\beta + \cot\rho)/E \\ N_c = [1 + \cot\rho \cot(\rho + \varphi)]/E \\ N_a = [\tan\rho + \cot(\rho + \varphi)]/[(1 + \tan\rho \cot\beta)E] \\ E = \cos(\beta + \delta) + \sin(\beta + \delta) \cot(\rho + \varphi) \\ \rho = (\pi - \varphi)/2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: w 为铲斗宽度, γ 为月壤密度, g 为月表重力加

速度, d 为铲挖深度, c 为月壤内聚力, v 为铲斗牵引速度, β 为铲挖角, ρ 为月壤滑裂面倾角, φ 为月壤内摩擦角, δ 为机—土摩擦角。

将表 2 中月表环境下的月壤抗剪强度仿真结果, 即内聚力 $c = 0.5145\text{kPa}$ 和内摩擦角 $\varphi = 39.736^\circ$ 代入式(11)中, 得月壤采样器的铲斗底面切削阻力模型。

2.3 侧壁切削阻力

分析月壤铲挖时的侧壁切削阻力 F 。根据 Kostritsyn 公式^[16], 侧壁板沿月壤沿切削方向的纯切削阻力为

$$F = 2K_1A_1\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + 2K_1A_1\mu\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + 2K_2A_2\mu \quad (12)$$

式中: K_1 为刃面处月壤变形比阻, K_2 为板面处月壤变形比阻, A_1 为月壤—刃面接触面积, A_2 为月壤—板面接触面积, α 为刀口刃角, μ 为机—土摩擦系数。

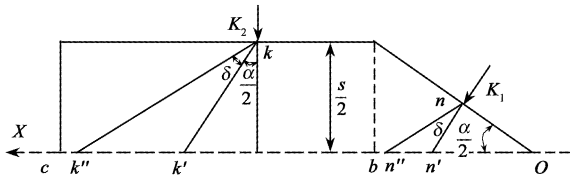


图 6 月壤变形比阻示意图

Fig. 6 Schematic diagram of deformation resistivity of lunar soil

对月壤的变形比阻进行分析。一方面, 在切削月壤过程中, 侧壁板施加在月壤上的作用力使月壤产生局部变形, 从而导致月壤切削面对侧壁板存在压力作用。如图 6 所示, 定义原点 O 为壁板刃尖, 切削反方向为 X 正向, s 为壁板厚度, 通过对壁板表面 n 和 k 点的月壤颗粒运动轨迹可知, 刃面 x 位置的月壤变形量 L_n 为

$$L_n(x) = x \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sec\left(\delta + \frac{\alpha}{2}\right) \quad (13)$$

板面处月壤变形量 L_k 为

$$L_k = \frac{s}{2} \sec\left(\delta + \frac{\alpha}{2}\right) \quad (14)$$

另一方面, 受月壤自身重力作用的影响, 月壤的预应力随深度的增加而不断增大。该预应力导致了月壤在垂直于壁板刃面的方向存在初始应变 ε_l 。由于该预应力对月壤呈现加载特性, 故利用式(8)

分析深度 h 处的月壤初始应变 ε_l , 有

$$\varepsilon_l(h) = \frac{\gamma gh(1 - \sin\varphi) - \varepsilon_{m \times 1}^T E_{m \times 1}}{E_{m+1} + \dots + E_N} \quad (15)$$

式中: $\varepsilon_{m \times 1}$ 为发生屈服的前 m 个弹塑性元件的屈服应变子矩阵, $E_{m \times 1}$ 为发生屈服的前 m 个弹塑性元件的弹性模量子矩阵, E_{m+1}, \dots, E_N 分别为未发生屈服的 $N - m$ 个弹塑性元件的弹性模量。

将变形比阻的计算转化为基于月壤弹塑性本构模型的半空间问题, 定义 n 为月壤形变方向, η 为月壤形变量, f 为刃面压力, 联立月壤的基本微分方程、应力边界条件及平衡方程, 有

$$\begin{cases} \frac{\partial I\left(E, \frac{d\eta_z}{dz}\right)}{\partial x} + \frac{\partial I\left(G, \frac{d\eta_n}{dz} + \frac{d\eta_z}{dn}\right)}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial I\left(E, \frac{d\eta_n}{dn}\right)}{\partial n} + \frac{\partial I\left(G, \frac{d\eta_n}{dz} + \frac{d\eta_z}{dn}\right)}{\partial z} + \\ \quad I\left(G, \frac{d\eta_n}{dz} + \frac{d\eta_z}{dn}\right) = 0 \\ I\left(E, \frac{d\eta_n}{dn}\right)_{\eta_n=0, \eta_z \neq 0} = 0 \\ I\left(G, \frac{d\eta_n}{dz} + \frac{d\eta_z}{dn}\right)_{\eta_n=0, \eta_z \neq 0} = 0 \\ \int_0^\infty I\left(E, \frac{d\eta_n}{dn}\right) 2\pi z dz + f = 0 \end{cases} \quad (16)$$

对壁板刃面处的月壤变形比阻 K_1 和板面处的月壤变形比阻 K_2 进行分析。由于切削过程中壁板对月壤不断挤压, 故该位置的月壤应变呈现加载特性。考虑月壤初始应变 ε_l , 结合式(15)和式(16), 采用数值方法对 $\eta_n = L_n(x)$ 和 $\eta_n = L_k$ 时的 f 进行计算, 得壁板的机—土接触面各位置的月壤变形比阻为

$$K_1 = f(L_n(x), \varepsilon_l) \sin\delta \quad (17)$$

$$K_2 = f(L_k, \varepsilon_l) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta \quad (18)$$

分析铲斗侧壁板对月壤的切削过程, 如图 7 所示。

定义 b 为侧壁板刀刃长度, 且切削深度 h 与侧壁板长度 x 间存在 $x = x(h)$, 则侧壁切削阻力 F 为

$$\begin{cases} F = F_{11} + F_{12} + F_2 \\ F_{11} = 2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \int_0^d \int_0^b K_1(h, x) dx dh \\ F_{12} = 2\mu \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \int_0^d \int_0^b K_1(h, x) dx dh \\ F_2 = 2\mu \int_0^d [X(h) - b] K_2(h) dh \end{cases} \quad (19)$$

根据表 5 所示的自适应遗传算法参数对月壤铲挖参数进行优化。图 8 显示了铲宽 $w = 0.3\text{m}$ 条件下的铲挖参数优化过程。优化结果表明,5 个铲宽条件下的铲挖参数均收敛至最优解。

表 5 自适应遗传算法设计参数

Table 5 Design parameters of self-adaptor GA

遗传算法设计参数	参数值
种群数量	30
最大遗传代数	50
二进制位数	32
决策变量长度	3
代沟	0.8
初始交叉概率	0.9
初始变异概率	0

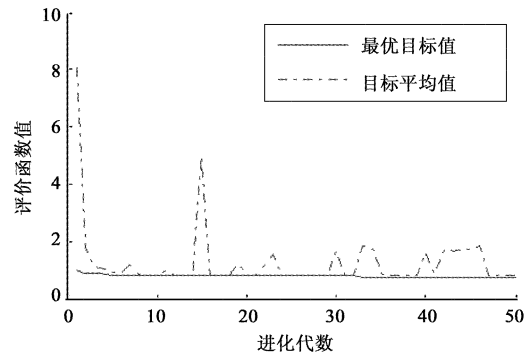


图 8 月壤铲挖参数优化过程

Fig. 8 Optimization process of lunar soil excavation parameters

经过计算,各个铲宽条件下的最优铲挖参数、月壤铲挖阻力和月壤收集速率如表 6 所示。

表 6 月壤铲挖参数优化结果

Table 6 Optimization result in the plan of minimum resistance

铲斗宽度 w/m	铲挖深度 d/cm	牵引速度 $v/(\text{m/s})$	铲挖角 $\beta/(\text{°})$	铲挖阻力 R_H/N	收集速率 $V/(\text{m}^3/\text{s})$
0.10	16.02	0.02	15.52	29.22	3.2×10^{-4}
0.15	16.41	0.02	14.20	36.48	4.9×10^{-4}
0.20	16.58	0.02	13.60	44.01	6.6×10^{-4}
0.25	16.86	0.02	13.24	52.02	8.4×10^{-4}
0.30	17.55	0.02	12.97	64.18	1.0×10^{-3}

由表 6 中的最优牵引速度计算结果可以看出,不同的铲宽条件下,铲斗牵引速度 v 均为优化取值范围上限,说明针对小尺寸采样器的浅层月壤铲挖, v 对铲挖阻力 R_H 的影响不大。通过对月壤铲挖阻力的分析可知, v 是铲斗底面推移阻力 T 中月壤土堡惯性力部分的重要影响因素,但由于浅层月壤小尺寸铲挖条件下,月壤土堡总质量较小,从而月壤土堡惯性力远小于 T 中的其他组成部分,最终导致 v 对铲挖阻力 R_H 的影响不大。

另外,由表 6 中的最优铲挖深度 d 和月壤铲挖角 β 可以看出,各个铲宽条件下均存在一个 β 和 d 的最优值,且随着 w 从 0.1m 增加至 0.3m, β 的最优值逐渐由 15.52° 递减至 12.97° ,而 d 的最优值逐渐由 16.02cm 递增至 17.55cm。

5 结 论

本文利用离散元法建立了浅层月壤的 Iwan 弹塑性本构方程,通过基于 Kostritsyn 土壤纯切削公式和 Mckyes 机—土静力平衡方程,分别对采样器铲斗

侧壁切削阻力和底面推移阻力进行了分析,建立了浅层月壤铲挖阻力预测模型。在此基础上,利用该预测模型,对铲宽小于 0.3m 的小型铲挖式采样器的浅层月壤最优铲挖参数进行了优化,得出结论如下:

- (1) 针对小尺寸浅层月壤采样器,其牵引速度对铲挖阻力影响不大,但可有效增加样本收集速率,因此铲斗牵引速度可在驱动机构及控制器允许的前提下适度增大。
- (2) 综合考虑铲挖阻力和样本收集速率,小尺寸浅层月壤采样器的最佳月壤铲挖深度约在 16cm ~ 18cm 范围内,并随着铲斗宽度的增大略有增加。
- (3) 月壤采样器最佳铲挖角约在 $12^\circ \sim 16^\circ$ 范围内,并随着铲斗宽度的增大逐渐降低。

以上工作对以浅层月壤为对象的铲挖阻力开展了分析,并对采样过程中的最优铲挖参数进行了计算。上述结论对机器人自主采样,特别是针对我国在月球二、三期探测计划中关于小型无人月壤采样器的研制,具有一定的工程参考价值。

参 考 文 献

- [1] 卢伟, 宋爱国, 凌云. 面向浅层月壤的小型取样器研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(9): 2065 - 2073. [Lu Wei, Song Aiguo, Ling Yun. Research on the sampler for shallow lunar regolith[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(9): 2065 - 2073.]
- [2] Osman M. The mechanics of soil cutting blades[J]. Journal of Agricultural Engineering, 1964, 9(4): 313 - 328.
- [3] Gill W, VandenBerg G. Agriculture handbook no. 316[M]. Washington DC: Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1968.
- [4] Swick W C, Perumpral J V. A model for predicting soil-tool interaction[J]. Journal of Terramechanics, 1988, 25(1): 43 - 56.
- [5] McKyes E. Soil cutting and tillage[M]. Amsterdam: Elsevier, 1985.
- [6] Muff T, King R H, Duke M B. Analysis of a small robot for Martian regolith excavation[C]. AIAA Space 2001 Conference & Exposition, Albuquerque, USA, August 28 - 30, 2001.
- [7] Hemami A, Daneshmend L. Force analysis for automation of the loading operation in an LHD-loader[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, May 12 - 14, 1992.
- [8] Balovnev V I. New methods for calculating resistance to cutting of soil[M]. New Delhi: Amerind Publishing Company, 1983.
- [9] Perkins S, Madson C. Mechanical and load-settlement characteristics of two lunar soil simulants[J]. Journal of Aerospace Engineering, 1996, 9(1): 1 - 9.
- [10] 梁东平, 柴洪友. 着陆冲击仿真月壤本构模型及有限元建模[J]. 航天器工程, 2012, 21(1): 18 - 24. [Liang Dong-ping, Chai Hong-you. Lunar soil constitutive model and finite element modeling for landing impact simulation [J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(1): 18 - 24.]
- [11] 卢波. 21 世纪空间探测的发展趋势及其小型化技术研究[C]. 中国空间科学学会空间探测专业委员会第十五次学术会议, 安徽池州, 2002 年 10 月.
- [12] 任子武, 伞冶. 自适应遗传算法的改进及在系统辨识中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 41 - 66. [Ren Zi-wu, San Ye. Improved adaptive genetic algorithm and its application research in parameter identification [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(1): 41 - 66.]
- [13] 李伟, 朱德懋, 胡选利, 等. 不连续散粒体的离散单元法[J]. 南京航空航天大学学报, 1999(1): 85 - 91. [Li Wei, Zhu De-mao, Hu Xuan-li, et al. Discrete element method of discontinuous granular media[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999(1): 85 - 91.]
- [14] 邹猛. 月面探测车辆驱动轮牵引性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008. [Zou meng. Study of traction ability for driving wheel of the Lunar rover[D]. Changchun: Ji Lin University, 2008.]
- [15] Iwan W D. On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite[J]. Journal of Applied Mechanics, 1967, 34(3): 612 - 617.
- [16] Kostitsyn A K. Resisance of soil to tillage tools of soil-working implements [M]. Washington DC: Al Ahram Center for Scientific Translations, 1981.
- [17] Smith P H, Tamppari L, Arvidson R E, et al. Introductin to special section on the Phoenix Mission: landing site characterization experiments, mission overviews, and expected science[J]. Journal of Geophysical Research: Planets (1991 - 2012), 2008, 113(E3): 2156 - 2202.

作者简介:

梁磊(1983 -), 男, 博士生, 主要从事月壤浅表层采样的机—土耦合作用的研究。

通信地址: 哈尔滨工业大学 359 信箱(150001)

电话: (0451) 86417756

E-mail: lianglei@hit.edu.cn

(编辑: 曹亚君)