doi:10.3799/dqkx.2013.000

基于模拟月壤挖取采样扭矩试验及建模

李 谦1,段隆臣1*,张大伟2,高 辉1,刘 宾2

中国地质大学工程学院,湖北武汉 430074
 北京空间飞行器总体设计部,北京 100094

摘要: 开展月球探测对于提升我国综合实力具有重要意义. 按照计划我国将在 2017 年左右完成月球采样并返回地球的目标. 目前国内各科研院所对采样机具的研究多集中在钻取机具的设计及其仿真模拟上,对表层取样机具研究较少. 基于表层取样 研发了一套由直流电机驱动,并能通过检测其电流间接测算挖取运动扭矩的试验机构. 利用该机构在 6 种不同的模拟月壤中 进行不同试验参数的挖取试验后可知,在不同的试验条件下挖取机构承受的扭矩变化趋势大致相同,并能由 4 个特征点进行 描述. 4 个特征点的取值随试验参数的不同而改变. 完成试验后将试验数据进行归一化处理后导入 BP 神经网络进行学习和训 练,建立了以运动参数(运动角度、机构悬挂高度)、模拟月壤类型(内聚力、内摩擦角)、模拟月壤密实程度(容积密度、孔隙度、 相对密实度)为输入量,机具承受扭矩为输出量的神经网络模型. 通过与实测数据对比可证明本文建立的 BP 神经网络挖取力 学模型具有很高的拟合和预测精度.

关键词: 表层采样;模拟月壤;扭矩;神经网络;工程地质.

中图分类号: P642 文章编号: 1000-2383(2013)06-1363-08

收稿日期: 2012-12-11

Experiment in Torque Model of Digging the Lunar Soil Simulant

LI Qian¹, DUAN Long-chen^{1*}, ZHANG Da-wei², GAO Hui¹, LIU Bin²

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
 Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

Abstract: It is very important to start the lunar exploration for the sake of the buildup of comprehensive strength of China. According to a national plan, the main task of Chang'E-3 probe is to sample on the moon and return to the earth. At present, the researches on sampling tools are focused on the designing and simulating the drilling tool and there is little research on the surface sampling tools. A simulated lunar surface sampling tool, which is driven by a DC motor and could measure the torque during the experiments by using the current sensor, is designed for the experiments. Based on six types of lunar soil simulant and parameters, the experimental data shows that the change tendency of the tool torque under different conditions is nearly the same, and the torque curve could be described by four-feature points, whose values change with the different experiments parameters. All normalized data is imported to the BP neural network for learning and training in order to establish the model. The input parameters are divided into three types, including motion parameters (angle and hanging height), type parameters (cohesion and internal friction angle), and dense parameters (density, porosity and relative denseness) and the output parameter is the torque. By comparing the measured data and the output data of the model, it shows that accuracy in both fitting and predicting of the BP neural network is extremely high.

Key words: surface sampling; lunar soil simulant; torque; neural networks; engineering geology.

探测月球对提升我国在科技、经济、军事等方面 的综合实力有重要意义.自 2004 年起我国正式开启 命名为"嫦娥工程"的月球探测工程,按照计划将在 2017年左右发射探测器实现月面软着陆,驱动取样装置采集月球样品并返回地球.

迄今为止成功的月球采样仅为前苏联的 Luna

基金项目:北京空间飞行器总体设计部"采样机具与月壤相互作用平台的研究"(No. 201205G007). 作者简介:李谦(1987-),男,博士研究生,主要从事计算机在地质工程中的应用的研究. E-mail: ql_eye@163. com * 通讯作者:段降臣,E-mail: duanlongchen@163. com

月球探测系列和美国的 Apollo 月球探测系列. 前苏 联 Luna 系列探测器通过自动钻取式采样机构先后 进行 3 次任务,采样总质量仅为 0.321 kg.美国 Apollo系列任务通过六次采样,在宇航员的协助下 用多种采样工具总共取得 381.7 kg 样品(欧阳自远 等,2002).目前国内外对行星探索采样提出了多种 不同原理的采样装置,主要可分为挖取式、夹取式、 研磨式、钻取式等(刘志全等,2011).1975年 NASA 在火星探测任务中发射的海盗号火星探测器在机械 臂末端设置的挖取式自动采样机构,利用类似铁锹 的动作进行样品采集(Moore, 1978);1997 年香港 理工大学为"行星表面小样本采样工具"项目所研发 的微型末端感应器利用类似夹钳的形式采取块状样 品(Anttila, 2005);2003 年英国 Honeybee Robotie 公司为 NASA 火星巡视探测器开发的研磨式采样 装置,能直接在小行星的表面对岩石进行研磨并现 场自动分析裸露出来的岩心(Thomas et al., 2004);2004 年欧空局发射的 Philae 号彗星探测着 陆器上携带的 SD2(Sampler, Drill and Distribution System)垂直直立式钻取采样装置能将钻取到的样 品分别转移到 26 个不同的容器中进行分析检测 (Gulkis and Alexander, 2008). 另外,也有相关研 究人员研发了基于超声波、激光和仿生式 (Bar-Cohen et al., 2003; Brain et al., 2004; Gao et al., 2006)自动采样机构.

就国内而言,哈尔滨工业大学先后对多杆组接 式月壤钻取采样系统和滑轨式钻取试验平台进行了 建模和运动学仿真分析(沈进进,2010;张禹, 2010);北京航空航天大学对空心钻杆组接式钻探取 样方式进行了有限元仿真分析(丁希仑等,2009); 中国空间技术研究院建立了双管单动外螺旋钻杆与 月壤的相互作用力学模型(庞彧等,2011);东南大 学设计了可伸缩的卷簧式月壤表层取样器,并进行 了动力学仿真分析(卢伟等,2011).

虽然现在国内外多家机构积极投身于月球探测

采样的研发中,但均集中在钻取式取样机具的设计 和仿真分析中.就前苏联 Luna 系列的经验来看,钻 取式取样机具由于机构和取样工艺的复杂,稳定性 和可靠性存在隐患,可能导致样品掉落采样量过少 的问题.表层采样机具可作为一个必要补充,而国内 目前对表层取样机具的相关研究较少,因此本文针 对表层取样设计了一套挖取式模拟工具并进行了相 关试验,利用试验数据结合神经网络建立了基于模 拟月壤的表层采样挖取模型.

2 物理试验

物理试验的主要目的在于获取建立模型需要的 试验数据,主要包含模拟月壤的制备、试验机具的设 计、试验方案设计和试验数据4大部分.

2.1 模拟月壤制备

物理试验中采用的模拟月壤为中国地质大学行 星科学研究所研制的专用于表层采样的 CUG_ 0.50、CUG_1.25 和 CUG_1.50 三种类型的模拟月 壤.其中 CUG_1.50 型物理等效性模拟月壤,通过 来自于吉林省辉南县大椅子山乡和江苏省南京市六 合县八百桥镇的矿物碎屑、原始结晶盐碎屑等原料 进行一定的配比混合而成,其物理特征及化学性能 均与真实月壤相近(贺新星等,2011).另外 CUG_ 1.25 和 CUG_0.50 两种月壤为力学等效性模拟月 壤,是为了模拟不同的重力环境而研制的.

在试验过程中,为了充分利用模拟月壤,设计将 3种类型的模拟月壤通过自然堆积和人工压密分别 制成松散和密实两种不同密实程度的样品.经测算, 试验用模拟月壤样品的力学参数如表1所示.

2.2 试验机具设计

试验机具设计如图 1 所示,通过直流电机控制 挖斗进行回转运动,模拟在月球表面的挖取动作.试 验中需要测量的核心力学参数为挖斗运动的扭矩,

表1 试验所用模拟月壤力学参数

Table 1	Mechanical	parameters of	lunar so	l stimulant	prepared	for the	experiments
---------	------------	---------------	----------	-------------	----------	---------	-------------

齿州日南十兴全粉	CUG_0.50		CUG_1.25		CUG_1.50	
快扒月	松散状态	密实状态	松散状态	密实状态	松散状态	密实状态
容积密度(kg/m ³)	364.000	473.000	1 129.000	1 286.000	1 799.000	1 894.000
孔隙度(%)	85.000	80.500	55.700	49.500	37.500	34.200
内聚力(kPa)	4.830	4.830	4.200	4.200	1.680	1.680
内摩擦角(°)	20.090	20.090	24.820	24.820	26.390	26.390
相对密实度	0.000	0.472	0.275	0.910	0.914	1.000



图 1 模拟表层采样挖取机具

Fg. 1 The digging tool of simulated surface sampling

由于机具尺寸的限制没有采用工业扭矩传感器直接 测量,而改用电流传感器进行间接测量,其主要测量 原理为:

直流电机在工作过程中输出扭矩 T 为空载扭 矩 T₀和负载扭矩 T_w之和,有

$$T = T_0 + T_w \,. \tag{1}$$

同时电机输出扭矩 *T* 与其输出功率 *P* 和输出 转速 *n* 直接相关,有

$$T = 9\,550P/n$$
. (2)

试验中选择的电机功率较小,在正常工作情况 下其输出转速 n 与空载转速 n₀、负载转速 n_w 近似 相等,因此结合式(1)、式(2)可得电机输出功率 P 为空载功率 P₀和负载功率 P_w 之和,有

$$P = P_0 + P_w \,. \tag{3}$$

令电机的工作效率为 η,则电机的输出功率 P 与其工作时的电压 U 和电流 I 成正比,有

 $P = UI\eta \,. \tag{4}$

电机在整个运动过程中工作效率 η 和电压 U 均保持不变,因此结合式(3)、式(4)可得在电机工作 过程中其输出电流 I 为空载电流 I。和负载电流 I_w 之和,有

$$I = I_0 + I_w \,. \tag{5}$$

同时由式(1)、式(2)和式(4)可得电机负载扭矩 *T*_w与负载电流 *I*_w成正比,有

$$T_{\rm w} = 9\ 550 U I_{\rm w} \eta / n_{\rm w} \,. \tag{6}$$

由式(6)可知负载扭矩 T_w与负载电流 I_w成正 比,直接测量工作时电机的输出电流 I,减去其空载 电流 I₀即可换算得出此时电机的负载扭矩 T_w.除 电流传感器外,在机具设计过程中加入旋转编码器 用以测量挖斗回转的角度.如图 2 所示.整套试验机 具通过手动控制直流电机的开启和关闭,直流电机 开启时旋转编码器和电流传感器自动进行参数的采



图 2 试验机具检测控制

Fig. 2 Detecting and controlling process of simulated tool

集,并实时通过数据采集卡传递到计算机进行检测 数据的显示和存储.

2.3 试验方案设计

基于试验机具设计过程中对扭矩进行间接测量 的方案,试验过程需要分为3个阶段:(1)标定阶段. 该阶段主要目的为确定电机的空载电流 I。以及实 际扭矩 Tw 和负载电流 Iw 的比例关系. 在该阶段中 先后进行4次试验,其中空载1次,3种已知扭矩 T_1 、 T_2 、 T_3 的试验各一次,获得4个输出电流 I_0 、 I_1 、 I_2 、 I_3 ,将由式(5)可得4个负载电流0、 I_{w1} 、 I_{w2} 、 I_{w3} (空载视为0负载).由于负载扭矩 $0,T_1,T_2,T_3$ 已知,由式(6)可直接通过线性回归确定电机实际工 作扭矩 T_w 与负载电流 I_w 的关系;(2)试验阶段.该 阶段的主要目的为获取不同条件下挖取模拟月壤的 输出电流 I.模拟月壤性质与松散沙土类似,根据土 力学相关理论分析,机具的挖取力学模型主要与模 拟月壤的力学参数有关,除此还与机具在运动过程 中没入模拟月壤的垂直深度(设该深度为没入深度) 相关.根据机具结构,机具在运动过程中没入深度可 用机具固定轴距模拟月壤表面的高度(设该高度为 悬挂高度)表示.因此设计试验方案时,主要考虑的 参数为模拟月壤的物理力学性质和悬挂高度.试验 方案设计采用穷举试验,总试验次数为:3种模拟月 壤(CUG_0.50 /CUG_1.25/CUG_1.50)×2 种模 拟月壤状态(松散/密实)×3种悬挂高度(0.203/ 0.193/0.180 m)×3 组重复试验=54 组试验;(3)数 据处理阶段.该阶段将计算得出挖斗在不同条件下 承受的扭矩. 在试验阶段中获取的 18 组不同情况下 的输出电流 I(3 组重复试验取平均值),减去标定阶 段确定的电机空载电流 I₀,得到 18 组不同情况下 的负载电流 I_w,再根据标定阶段确定的实际工作扭 矩 Tw与负载电流 Iw的关系,即可确定18组不同

第 38 卷

Table 2 Total leature data at an experiments									
模拟月壤		具壮育座(…)	起始上扬点		第一峰值点		谷底点		第二峰值点
类型	状态	- 念狂同及(m)	位置(°)	值(N・m)	位置(°)	值(N•m)	位置(°)	值(N・m)	值(N•m)
CUG_0.50	松散型	0.203	59.2	0.012	102.3	0.740	131.7	0.041	0.293
CUG_0.50	松散型	0.193	63.1	0.064	98.1	1.048	121.8	0.444	0.512
CUG_0.50	松散型	0.180	62.4	0.079	97.1	1.867	125.7	0.567	0.630
CUG_0.50	密实型	0.203	62.6	0.003	98.4	1.610	116.0	0.241	0.450
CUG_0.50	密实型	0.193	58.3	0.027	91.8	2.784	120.1	0.465	0.616
CUG_0.50	密实型	0.180	57.0	0.089	91.5	4.061	124.6	0.542	0.670
CUG_1.25	松散型	0.203	65.8	-0.020	104.5	1.307	134.3	0.578	0.754
CUG_1.25	松散型	0.193	66.3	0.044	93.7	1.669	124.6	0.562	0.800
CUG_1.25	松散型	0.180	63.9	-0.038	99.2	1.809	133.7	0.678	0.863
CUG_1.25	密实型	0.203	61.1	0.020	110.0	4.037	172.3	0.851	0.851
CUG_1.25	密实型	0.193	59.2	0.008	94.5	4.257	120.8	0.695	1.074
CUG_1.25	密实型	0.180	63.1	0.013	105.4	5.475	132.1	1.008	1.085
CUG_1.50	松散型	0.203	65.3	-0.036	89.3	1.410	114.3	0.437	0.887
CUG_1.50	松散型	0.193	69.6	-0.040	95.7	1.815	122.4	0.497	0.810
CUG_1.50	松散型	0.180	63.9	-0.078	99.0	2.028	124.5	0.677	1.166
CUG_1.50	密实型	0.203	62.4	-0.090	97.5	3.367	118.8	0.468	0.999
CUG_1.50	密实型	0.193	60.0	0.021	97.4	4.159	113.1	0.664	1.064
CUG_1.50	密实型	0.180	58.3	-0.055	90.7	6.933	115.3	1.059	1.355



Table 2 Total feature data at all experiments





Fig. 3 Feature points and torque curve of loose CUG_1. 50 simulated lunar soil at hanging height of 0. 193 m

试验参数条件下的挖斗扭矩 Tw.

2.4 试验数据

完成试验后分析所有的试验数据可得出以下结 论:(1)挖斗在整个运动过程中的扭矩曲线可通过起 始上扬点、第一峰值点、谷底点和第二峰值点4个特 征点的取值进行概括,如表2所示不同的试验条件下 4个特征点的取值明显不同;(2)除取值不同外,挖斗 在运动过程中扭矩的变化趋势完全类似,可由4个特 征点明显的划分为扭矩零值波动、扭矩上升、扭矩下 降和扭矩缓慢上升4个阶段,如图3所示.

3 神经网络建模

3.1 建模工具的选用

人工神经网络(Artificial Neural Network,简称 ANN)技术自 20 世纪 40 年代起源以来,经历计



图 4 BP 神经网络算法结构 Fig. 4 Structure of BP neural network algorithm

算机硬件、软件和计算理论的蓬勃发展,至今已形成 一种能进行并行分散处理、具有非线性映射、自适应 学习和较强容错性的智能分析工具.其中基于误差 反向传播算法(Back-Propagation)的 BP 神经网络 在模式识别、风险评价、自适应控制等工程领域有着 最为广泛的引用(张德丰等, 2012).

如图 4 所示 BP 算法作为人工神经网络的一种 典型算法,主要是由一个输入层、一个或多个隐含 层、一个输出层组成. 各层由若干个神经节点构成, 每一个节点的输出值由输入值、作用函数和阈值决 定. 网络整个学习过程由信息的正向传播和误差反 向传播两个过程构成. 信息的正向传播过程中输入 信息从输入层传递给隐含层,经过隐含层处理(多个 隐含层的情况下则逐层处理)的数据传递给输出层, 输出层处理后作为最终结果输出;而在误差的反向 传播过程中,网络自动对比输出结果与期望输出值 得误差,若误差过大则逐层将误差信息反馈给输出 层和隐含层,系统自行调整隐含层和输出层阈值并 重新计算,如此循环输出误差满足要求为止.整个信 息的正向传播和误差的反向传播构成了 BP 神经网 络的学习和训练过程.

在保证训练和学习数据量的前提下,学习后的 BP 神经网络对多输入单输出非线性模型具有极高 的拟合和预测精度.根据物理试验中对参数的设置, 本文需要建立的基于模拟月壤的表层挖取采样模型 输入量包含3大类:(1)运动参数(运动角度、悬挂高 度);(2)模拟月壤类型参数(内聚力、内摩擦角);(3) 模拟月壤密实程度参数(容积密度、孔隙度、相对密 实度),输出量为试验机具运动过程中的扭矩.结合 图 3 可知该模型为典型的多输入单输入非线性模 型.试验中数据的采样频率为 100 Hz,保证每组试 验至少存在 1 200 条数据,进而保证了 BP 神经网络 的精度.

3.2 模型建立与评估

3.2.1 数据准备 为保证建立模型的可靠性,建立 模型之前需要对建模数据进行分组.总共18组试验 数据中,将3种类型的模拟月壤中所有悬挂高度为 0.203 m和 0.180 m的数据(12组)用于学习,将悬 挂高度为 0.193 m的所有密实型模拟月壤(3组)用 于训练.考虑到真实的表层月壤取样环境,设定悬挂 高度为 0.193 m的所有松散型模拟月壤(3组)用于 最终测试,验证模型的精度.

由表1可知,各输入数据之间差异过大,最大差 异达到3个数量级,如此巨大的差异将严重干扰BP 神经网络的学习和训练,因此使用数据建立模型之 前需要将所有数据(包含输入和输出)进行归一化处 理,即将所有输入输出参数值转化为区间的数.结合 各参数取值范围,本模型建立时采用的归一化处理 方案为:

$$D'=D/a$$
 .

式中:D'为归一化处理后的数据;D为归一化处理 前的数据;a为归一化常数,对于不同的输入和输出 参数,其归一化常数如表3所示.

3.2.2 建立模型 完成所有的数据分组和归一化 处理后,将所有学习训练数据的输入和输出的变量 值导入 Matlab 软件,分别命名为 input 和 target. 利 用软件自带的神经网络工具箱可完成模型的建立和 学习训练过程,其核心代码如下:

表 3 不同变量的归一化常数

Fabl	е З	Normalization	i constants o	t different	parameters
------	-----	---------------	---------------	-------------	------------

参数	归一化常数	参数	归一化常数
运动角度	180	内聚力	10
起始高度	1	内摩擦角	100
容积密度	2 000	相对密实度	1
孔隙度	100	扭矩	10

%构造网络模型

net = newff(input, target, {'tansig', 'purelin'}, 'trainlm');

%网络模型参数配置

net. trainParam. epochs=500;

net. trainParam. lr = 0.7;

net. trainParam. goal=0.0001;

%初始化网络模型

net=init(net);

%网络模型的学习与训练

net = train(net,input, target);

3.2.3 评估模型 训练好的 BP 神经网络模型可 通过均方差 MSE 和相关系数 R 两个参数进行评 价.均方差 MSE 和相关系数 R 均表征了神经网络 输出数据与期望值之间的拟合程度,均方差 MSE 越接近 0,相关系数 R 越接近 1 表示神经网络的输 出越接近期望输出值.如表 4 所示,针对本次模拟月 壤表层挖取采样模型训练好的 BP 神经网络模型在 学习和训练阶段均方差 MSE 均小于 0.001,而相关 系数 R 均大于 0.99,表明本模型在与学习和训练使 用的 15 组试验数据进行对比而言具有非常高的拟 合精度.

3.3 模型验证

(7)

对训练完成的 BP 神经网络模型进行验证的主要目的在于保证其预测的精度.若网络模型仅仅在学习和训练阶段的拟合精度高而面对新输入数据时预测精度低则该模型应用价值不高.

如图 5 所示为 3 种不同类型的松散型模拟月壤 在悬挂高度为 0.193 m 时实测数据和 BP 神经网络 输出的预测数据对比,可看出测试的 3 组数据中预 测输出的扭矩与实测扭矩吻合程度很高.将3组

表 4 BP 神经网络评价参数

Lable 4 Evalu	ation parameters of I	3P neural network
建模阶段	均方差 MSE	相关系数 R
学习阶段	1.256×10^{-4}	0.995
训练验证阶段	1.193×10^{-4}	0.996



图 5 完成学习训练的 BP 神经网络 3 种不同的模拟月壤输出数据

Fig. 5 Validation between the real data and predict data from trained BP neural network among three different lunar soil simulant

数据中特征点的实测值和预测值对比如表 5 所示. 从表 5 中可看出,在所有测试数据中除了起始上扬 点的误差较大外,其余 3 个特征点的误差都控制在 10%以内.起始上扬点的误差是由于实测数据存在 波动,又因其本身的值较小,小幅度的波动即可引起 很大的误差.

3.4 模型使用

经过验证可知,学习和训练完成的 BP 神经网 络模型在拟合和预测两方面模拟月壤表层挖取采样 机具的扭矩时均具有较高的精度,在一定程度上能 满足科研的需要.基于 Matlab 平台强大而完善的计 算能力,对本文建立的 BP 神经网络模型使用非常 简易,如图 6 所示只需如下几个步骤:(1)将需要计 算的 7 个输入变量导入,生成输入矩阵 input;(2)调 用完成学习训练的神经网络 net,调用代码为:load net.mat;(3)使用神经网络计算输出扭矩 output,计 算代码为:output=sim(net,input);(4)将输入参数 中运动角度单独提出生成矩阵 X_i (5)结合输出扭矩 output 和运动角度 X 绘制扭矩图形,制图代码为: plot(X, ouput).

表う 倶型短祉误差灯

Table 5 Comparison of model validation errors

模拟月壤	对比	参数	预测	实测	误差(%)
CUG_0.50	起始上扬点	位置(°)	51.6	63.1	18.2
CUG_0.50	起始上扬点	值(N・m)	0.056	0.064	12.5
CUG_0.50	第一峰值点	位置(°)	99.3	98.1	1.2
CUG_0.50	第一峰值点	值(N・m)	0.985	1.048	6
CUG_0.50	谷底点	位置(°)	125.1	121.8	2.7
CUG_0.50	谷底点	值(N・m)	0.413	0.444	7.0
CUG_0.50	第二峰值点	值(N•m)	0.500	0.512	2.3
CUG_1.25	起始上扬点	位置(°)	65.7	66.3	0.9
CUG_1.25	起始上扬点	值(N•m)	0.038	0.044	13.6
CUG_1.25	第一峰值点	位置(°)	94.6	93.7	1.0
CUG_1.25	第一峰值点	值(N•m)	1.614	1.669	3.3
CUG_1.25	谷底点	位置(°)	119.5	124.6	4.1
CUG_1.25	谷底点	值(N•m)	0.574	0.562	2.1
CUG_1.25	第二峰值点	值(N•m)	0.751	0.800	6.1
CUG_1.50	起始上扬点	位置(°)	67.9	69.6	2.4
CUG_1.50	起始上扬点	值(N•m)	-0.046	-0.040	15
CUG_1.50	第一峰值点	位置(°)	99.3	95.7	3.8
CUG_1.50	第一峰值点	值(N•m)	1.681	1.815	7.4
CUG_1.50	谷底点	位置(°)	122.9	122.4	0.4
CUG_1.50	谷底点	值(N•m)	0.514	0.497	3.4
CUG_1.50	第二峰值点	值(N•m)	0.753	0.810	7.0



图 6 模型使用流程 Fig. 6 The process of using the model

4 结论

在完成基于模拟月球表层采样挖取试验,并利 用试验数据结合 BP 神经网络建立模型后,得出以 下结论:(1)经过试验数据和电机额定扭矩的对比, 结合试验过程的观察,证明利用电流传感器间接测 量电机工作扭矩的测量方案可靠;(2)通过对试验数 据的分析,不同试验参数的挖取动作在整个运动过 程中扭矩变化趋势完全相同,仅取值不同.扭矩变化 曲线可通过起始上扬点、第一峰值点、谷底点和第二 峰值点 4 个特征点进行描述;(3)利用 BP 神经网络 建立模型时,原始试验数据变量间的数量级差异将 会显著影响网络的准确性,因此在建立模型时需要 对变量进行归一化处理;(4)经过与试验数据的验 证,基于 BP 神经网络的模拟月球表层采样挖取运 动扭矩模型具有很高的拟合和预测精度,利用 Matlab平台的计算功能可以简易的调用模型进行计 算,方便后续进行相关研究使用.

References

- Anttila, M. E., 2005. Concept Evaluation of Mars Drilling and Sampling Instrument (Dissertation). Helsinki University of Technology, Holland.
- Bar-Cohen, Y., Bao, X., Chang, Z., et al., 2003. An Ultrasonic Sampler and Sensor Platform for In-Situ Astrobiological Exploration. SPIE Smart Structures and Materials Symposium, 5056: 457 – 465. doi: 10. 1117/12. 483391
- Brian, C. G., Samih, B., James, F. R., et al., 2004. Geological Investigation of Lunar and Martian Subsurface Using Laser Drilling System. AIAA Space 2004 Conference

and Exposition, 3:28-30. doi:10.2514/6.2004-6046

- Ding, X. L., Li, K. J., Yin, Z. W., 2009. Multi-Rod Deep Drilling for Lunar Subsurface Sampling. *Journal of Astronautics*, 30(3):1189-1194 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y., Alex, E., Mustafa, J., et al., 2006. Deployable
 Wood Wasp Drill for Planetary Subsurface Sampling.
 In: IEEE Aerospace Conference. Inst. of Elec. and Elec.
 Eng. Computer Society, Valencia. doi: 10.1109/AERO.
 2006. 1655756
- Gulkis, S., Alexander, C., 2008. Composition Measurements of a Comet from the Rosetta Orbiter Spacecraft. *Space Science Reviews*, 138(1-4):259-274. doi:10.1007/ s11214-008-9335-2
- He, X. X., Xiao, L., Huang, J., et al., 2011. Lunar Soil Simulant Development and Lunar Soil Simulant CUG-1A. *Geological Science and Technology Information*, 30 (4):137-142 (in Chinese).
- Liu, Z. Q., Pang, Y., Li, X. L., 2011. Characteristics and Applications of Automatic Sampling Mechanisms for Deep Exploration. Spacecra ft Engineering, 20(3):120-125 (in Chinese with English abstract).
- Lu, W., Song, A. G., Ling, Y., 2011. Research on the Sampler for Shallow Lunar Regolith. *Journal of Astronautics*, 32(9): 2065-2073 (in Chinese with English abstract).
- Moore, H. J., 1978. Rock Pushing and Sampling under Rocks on Mars. U. S. Govt. Print. Off., Washington.
- Ou Yang, Z. Y., Zou, Y. L., Li, C. L., et al., 2002. The Moon—Outpost for Human Stepping into Space. Tsinghua University Press, Beijing (in Chinese).
- Pang, Y., Deng, X. J., Zheng, Y. H., 2011. The Design of Automatic Drilling Tool for Lunar Sampling. In: Chinese Society of Astronautics, ed., The Eighth Congress of Deep Space Exploration Subcommission under Chinese Society of Astronautics. Committee of Deep Space Exploration Technology, Shanghai (in Chinese).
- Shen, J. J. , 2010. The Study of Multi-Pipe Lunar Soil Drilling-Sampling Technology (Dissertation). Harbin Institute of Technology, Harbin (in Chinese with English abstract).
- Thomas, M. M., Lee, C., Chau, C. J., et al., 2004. The RAT as a Mars Rock Physical Properties Tool. AIAA Space 2004 Conference and Exhibit, 3: 2141-2151. doi: 10. 2514/6. 2004-6096
- Zhang, D. F., et al., 2012. Application of Artificial Neural Network Based on MATLAB, China Machine Press, Beijing (in Chinese).

Zhang, Y., 2010. Research on the Key Technology of Drilling-Sampling System of Slide-Type for Lunar Soil (Dissertation). Harbin Institute of Technology, Harbin (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁希仑,李可佳,尹忠旺,2009. 面向月壤采集的多杆深层 采样器. 宇航学报,30(3):1189-1194.
- 贺新星,肖龙,黄俊,等,2011.模拟月壤研究进展及 CUG-1A模拟月壤.地质科技情报,30(4):137-142.
- 刘志全, 庞彧, 李新立, 2011. 深孔探测自动采样机构的特点及应用. 航天器工程, 20(3): 120-125.
- 卢伟,宋爱国,凌云,2011.面向浅层月壤的小型取样器研

究. 宇航学报, 32(9): 2065-2073.

- 欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 等, 2002. 月球——人类走进 深空的前哨站. 北京:清华大学出版社.
- 庞彧,邓湘金,郑艳红,2011.面对月壤采集的自动钻取机 构设计.见:中国宇航学会深空探测技术专业委员会编 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第八届学术年 会论文集(下).上海:中国学术期刊.
- 沈进进,2010.多杆组接式月壤钻取采样技术研究(硕士学 位论文).哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- 张德丰等, 2012. MATLAB 神经网络应用设计. 北京: 机械 工业出版社.
- 张禹,2010. 滑轨式月壤钻取采样装置关键技术研究(硕士 学位论文). 哈尔滨:哈尔滨工业大学.