月球着陆器着陆过程动力学分析

王 闯 刘荣强 邓宗全 高海波

(哈尔滨工业大学 机电工程学院,哈尔滨, 150001)

摘 要: 以哈尔滨工业大学宇航空间机构及控制研究中心研制的四腿桁架式月球着陆器样机为研究对象,通过简化模型,导出了着陆器着陆过程中各个着陆脚和着陆器质心在惯性坐标系中的位置坐标方程,以此位置坐标方程为依据得到了着陆器准静态稳定性条件. 通过分析着陆器与月面着陆时瞬态动力学行为,得到了着陆器在此瞬态的各动力学参数的计算公式,以此为依据,并离散时间变量,给出了可以程序化实现整个动态着陆过程动力学模拟的计算过程,为进一步研究着陆过程动力学行为奠定了基础.

关 键 词: 月球着陆器; 准静态; 动力学; 桁架

中图分类号: V 414

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)04-0381-05

Dynamics analysis of lunar lander's landing process

Wang Chuang Liu Rongqiang Deng Zongquan Gao Haibo

(School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China)

Abstract: The prototype of spatial trussed lunar lander was taken as a researching object. It was designed and manufactured by RCAMC HIT (Research Center of Aerospace Mechanism and Control, Harbin Institute of Technology). The simplified model of the lunar lander construction was given. Then, the location coordinate equations of every lunar lander foot and center of mass in inertial coordinate system were deduced. Based on these location coordinate equations, the lunar's quasi-static stability condition was gotten. By analyzing the lunar lander's transient dynamics behavior during the landing time, the formulas to calculate the transient dynamic parameters of the lunar lander during the landing time were derived; Through scattering time variables, the calculating procedures that can be imitated dynamic characters of the whole landing process were put forward, which laid a foundation for further research on the lunar lander's landing dynamics behavior.

Key words: lunar lander; quasi-static; dynamics; truss

美国在20世纪90年代初提出了重返月球的计划,紧随其后各个空间大国也都制定相应的探测计划[1]. 开展月球探测,月球着陆器作为探测仪器的载体是不可或缺的. 由于月球环境是一个近乎真空的环境,使得着陆器在着陆时采用机械式缓冲较其它缓冲形式更具生命力,如已经发射成功的 Surveyor系列[2]、Apollo系列[3]和 Luna系列[4]探测器,欧洲空间局提出的一种着陆器模型 EuroMoon2000[5],都是采用机械式缓冲的思想,即通过缓冲材料的变形吸收着陆器的着陆冲击能量. 在本文提出的一种四腿桁架式月球着陆器原理样机基础上,结合前人的研究成果,对着陆器着陆时的准静态稳定性条件和着陆过程动力学进行研究. 本文研究的着陆过程系指着陆器开始接触月面并与其碰撞并最终稳定着陆到月面的过程.

1 着陆器结构原理

着陆器的简化模型如图 1所示,着陆器由着陆腿和着陆器基体两部分组成. 着陆腿由安装有缓冲吸振器的主着陆腿、辅助着陆腿和着陆足垫

收稿日期: 2007-04-05

基金项目: 高等学校学科创新引智计划资助项目 (B07018)

作者简介: 王 闯 (1980 -),男,安徽宿州人,博士生, wangchuang@hit.edu.cn.

组成. 缓冲吸振器采用活塞式结构,内装缓冲吸振材料(铝蜂窝). 着陆时主着陆腿可作单向收缩运动以吸收竖直方向的冲击能量;辅助着陆腿可作双向(收缩和伸长)运动,用于适应不同的着陆姿态,并吸收来自横向的冲击能量;着陆足垫主要用来增大着陆接触面积,使得着陆瞬时的冲击力趋于平稳. 着陆器基体采用空间桁架结构. 着陆器着陆腿只能在基体所在六面体的纵向对角面内运动. 计算着陆时着陆足垫的受力时,可以把着陆足垫简化为作用到连接副上的具有集中质量的质点,文中称之为着陆脚点.

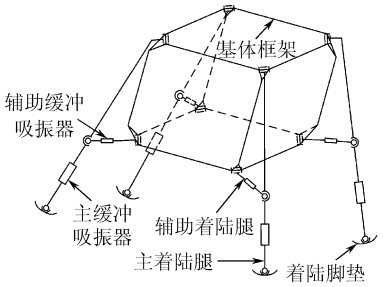


图 1 着陆器结构原理图

2 准静态稳定性判据

所谓准静态是指着陆器着陆时某一瞬时的速度和加速度均为零时的姿态.

2.1 惯性系和动坐标系之间变换方程

取惯性坐标系 $\xi\zeta\eta$ 的 η 轴正向为 g(月球重力加速度)的负方向,动坐标系 xyz 的原点 O 为着陆器质心,在惯性系中的坐标为 (ξ_O, ζ_O, η_O),3个坐标轴分别垂直于着陆器主体所在六面体的6个面,惯性系和动坐标系均为右手系,见图2. 为绘图方便,取 η 轴正向为水平向左方向. 取欧拉变换次序为:先把惯性系原点移至着陆器质心使其与动坐标系原点重合,绕动坐标系的 y 轴转 ψ 角,然后绕转动后得到的动坐标系的 x 轴(节线)为转轴转 θ 角,最后绕动坐标系的 y 轴转 ϕ 角,由欧拉坐标系的定义知 $\theta \neq 0$,结合着陆器实际姿态得 θ 的取值为 $(0, \pi)$,可得欧拉变换矩阵:

$$T = T_s(\xi_0, \zeta_0, \eta_0)\, R(\zeta, \psi)\, R(x, \theta)\, R(y, \phi) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\phi - \sin\psi\cos\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\theta & \cos\psi\sin\phi + \sin\psi\cos\theta\cos\phi & \xi_O \\ \sin\theta\sin\phi & \cos\theta & -\sin\theta\cos\phi & \zeta_O \\ -\sin\psi\cos\phi - \cos\psi\cos\theta\sin\phi & \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\sin\phi + \cos\psi\cos\theta\cos\phi & \eta_O \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,T_s 为移动矩阵;R 为转动矩阵,下文出现的相同符号意义相同.

最后得到由动坐标系到惯性系的关系式:

$$\{\xi \quad \zeta \quad \eta \quad 1\}^{\mathrm{T}} = T\{x \quad y \quad z \quad 1\}^{\mathrm{T}} \quad (2)$$

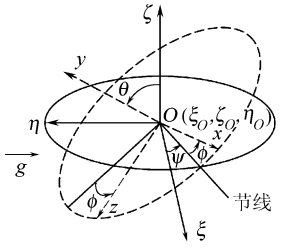


图 2 欧拉坐标系的确定

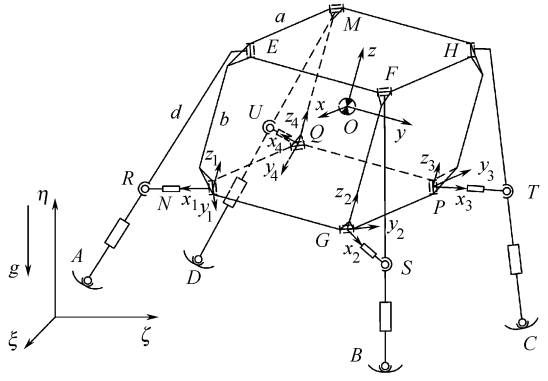


图 3 着陆器各个坐标系关系图

2.2 缓冲完成后着陆器姿态的确定

惯性系和动坐标系的建立原则同 2.1,以质心 O(在惯性系中的坐标为 (ξ_O, ζ_O, η_O))为坐标原点,分别垂直于6个面的矢量为坐标轴,建立如图3的动坐标系 xyz. 由于着陆腿的质量较着陆器基体很小,计算时忽略着陆腿对惯性矩的影响,取此时着陆器的主惯性矩分别为 I_x, I_y, I_z,着陆器主体为正六面体结构,边长(转动副中心距离)为 a,高(转动副中心距离)为 b,主腿外筒(RE, SF, TH, UM)长为 d,则8个角点(转动副中心位置)的坐标分别为:$E(a/2, -a/2, b/2)$, $F(a/2, a/2, b/2)$, $H(-a/2, a/2, b/2)$, $M(-a/2, -a/2, b/2)$, $N(a/2, -a/2, -b/2)$, $G(a/2, a/2, -b/2)$, $P(-a/2, a/2, -b/2)$, $Q(-a/2, -a/2, -b/2)$.

4个主着陆腿初始长度为 l_1,着陆后的压缩量分别为 s_1, s_2, s_3, s_4,4个辅助着陆腿的初始长度为 l_2,着陆后的变化量分别为 n_1, n_2, n_3, n_4(压缩为正,伸长为负). 分别以 N, G, P, Q 为原点,建立局部坐标系 $x_1y_1z_1$, $x_2y_2z_2$, $x_3y_3z_3$, $x_4y_4z_4$, NE、GF、PH、QM 为 z_1, z_2, z_3, z_4 的正向,着陆腿 ARE/RN、

BSF/SG、CTH/TP、DUM/UQ分别位于各自坐标面 z_1x_1, z_2x_2, z_3x_3, z_4x_4中.

坐标系 $x_iy_iz_i$ $(i=1, 2, 3, 4)$可由坐标系 xyz经如下变换得到:先绕 z_i轴旋转 $-45°$,然后沿 x_1平移$\sqrt{2}a/2$,最后绕 z_i轴平移 $-b/2$.则坐标系 $x_1y_1z_1$到 xyz的变换矩阵 T_1可由 T_i得到:

$$T_i = \mathrm{sign}(2\ 5-i)\cdot\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & (-1)^{i+1}\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{a}{2} \\ (-1)^i\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{2}{2} & 0 & (-1)^i\frac{a}{2} \\ 0 & 0 & 1 & -\mathrm{sign}(2\ 5-i)\frac{b}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中, $\mathrm{sign}(2\ 5-i)=\begin{cases}1, & \text{当 } i=1,2\\ -1, & \text{当 } i=3,4\end{cases}$

则在坐标系 $x_1y_1z_1$中,主着陆腿 AE始终位于坐标面 x_1z_1中, E在此坐标系中的坐标为 $(0, 0, b)$,可得 A在坐标系 $x_1y_1z_1$下的坐标为:$((l_1-s_1)\sin\angle AEN, 0, -(l_1-s_1)\cos\angle AEN+b)$,其中, $\cos\angle AEN=\dfrac{b^2+d^2-(l_2-n_1)^2}{2bd}$.

同理可求得 B点、C点、D点在相应坐标系下的坐标.

通过式 (3)给出的变换矩阵 T_i可以把 A, B, C, D 4个点在各自局部坐标系中的坐标变换到动坐标系 xyz中,然后通过式 (2)给出的变换公式,可以得到 A, B, C, D 4个点在惯性系中的统一坐标表达式:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{sign}(2\ 5-i)(\cos\psi\cos\phi-\sin\psi\cos\theta\sin\phi+(-1)^i\sin\psi\sin\theta)\Delta_{i2}+(\cos\psi\sin\phi+\sin\psi\cos\theta\cos\phi)\Delta_{i1}+\xi_0 \\ \mathrm{sign}(2\ 5-i)(\sin\theta\sin\phi+(-1)^i\cos\theta)\Delta_{i2}-\sin\theta\cos\phi\Delta_{i1}+\zeta_0 \\ \mathrm{sign}(2\ 5-i)(-\sin\psi\cos\phi+(-1)^i\cos\psi\sin\theta-\cos\psi\cos\theta\sin\phi)\Delta_{i2}+(\cos\psi\cos\theta\cos\phi-\sin\psi\sin\phi)\Delta_{i1}+\eta_0 \end{bmatrix}$$

其中

$$\Delta_{i1}=\frac{-l_1+s_i}{2bd}(b^2+d^2-(l_2-n_i)^2)+\frac{b}{2}$$

$$\Delta_{i2}=\frac{\sqrt{2}}{4}(l_1-s_i)\cdot\left(4-\frac{(b^2+d^2-(l_2-n_i)^2)^2}{b^2d^2}\right)^{1/2}+\frac{a}{2}$$

$$\mathrm{sign}(2\ 5-i)=\begin{cases}1, & \text{当 } i=1,2\\ -1, & \text{当 } i=3,4\end{cases}$$

A, B, C, D这 4个着陆脚点在惯性系 $\xi\zeta\eta$的水平面 $\xi\zeta$上的投影为一四边形,在准静态条件下,当着陆器质心 O在面 $\xi\zeta$上的投影落于此四边形区域之中时,着陆器是稳定的,反之,着陆器则可能翻倒,导致着陆任务失败.

3　着陆过程瞬时受力分析

图 4为铝蜂窝试件在 Instron试验机上得到的冲击载荷下的典型载荷 变形曲线图. 为了分析研究的方便,用分段线性曲线拟合实际的载荷 变形曲线,载荷 变形曲线可以看成由初始上升段和平稳段两段折线组成.

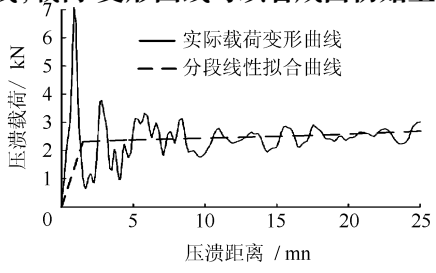


图 4　铝蜂窝载荷 变形曲线

着陆器的着陆过程是一个复杂的动力学过程,着陆过程中的受力与碰撞历程紧密相关,且与着陆姿态有关,为了分析整个着陆动力学过程,有必要对时间进行离散,以确定在已知时刻碰撞后的着陆器姿态和各项动力学参数,然后通过递推确定下一时刻乃至整个着陆过程动力学参数.

3.1　着陆脚点与着陆平面

与 4个着陆脚点接触的着陆面可用 4个着陆平面 (简称着陆面)来分别模拟,设在某一瞬时, P_j代表与着陆脚点 A, B, C, D相对应的着陆面,取着陆脚点的坐标为 $(x_{F,j}, y_{F,j}, z_{F,j})$,则 P_j方程为

$$N_{x,j}x+N_{y,j}y+N_{z,j}z+N_j=0 \qquad j=1, 2, 3, 4 \tag{4}$$

式中, $N_{x,j}, N_{y,j}, N_{z,j}$为第 j个着陆脚点所在着陆平面在 3个坐标轴方向的单位法矢量.

着陆脚点与着陆面之间的关系可用穿入和自由界定. 穿入是指着陆脚点与着陆面接触,且着陆脚点速度在接触面的法线方向的分量沿着陆面向下,即有使着陆脚穿入着陆面的趋势;自由则是指着陆脚点与着陆面不接触或接触但着陆脚点速度在接触面的法线方向的分量沿着陆面向上 (使着陆脚有远离着陆面的趋势). 可以通过下面两组法则判别.

穿入时满足:

$$\begin{cases} N_{x,j}x_{F,j}+N_{y,j}y_{F,j}+N_{z,j}z_{F,j}+N_j<0 \\ N_{x,j}\dot{x}_{F,j}+N_{y,j}\dot{y}_{F,j}+N_{z,j}\dot{z}_{F,j}+N_j\le 0 \end{cases} \tag{5}$$

自由时满足:

或
$$\left.\begin{aligned} &N_{x,j}x_{F,j}+N_{y,j}y_{F,j}+N_{z,j}z_{F,j}+N_j \geq 0\\ &N_{x,j}x_{F,j}+N_{y,j}y_{F,j}+N_{z,j}z_{F,j}+N_j < 0\\ &N_{x,j}\dot{x}_{F,j}+N_{y,j}\dot{y}_{F,j}+N_{z,j}\dot{z}_{F,j}+N_j > 0 \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中, $x_{F,j}$, $y_{F,j}$, $z_{F,j}$为着陆脚点的坐标. 着陆面上部点到着陆面的距离为正,反之为负.

3.2 着陆脚点与着陆面的作用力

当着陆脚穿入着陆面(式(5)满足)时,着陆脚与着陆面之间的作用力由3个力组成,即与压入距离有关的准静态力 $F_{FNS,j}$,与着陆脚速度在接触面法向的分量成正比的动态法向力 $F_{FND,j}$,与着陆脚速度在接触面切向的分量成正比的动态切向力 $F_{FTD,j}$,这3个力可通过下面各式计算[6]:

$$(F_{FNSx,j}, F_{FNSy,j}, F_{FNSz,j}) = F_{FNS,j}(N_{x,j}, N_{y,j}, N_{z,j}) \tag{7}$$

其中, $F_{FNS,j} = K_{1,j}D_j + K_{2,j}D_j^2 + K_{3,j}D_j^3$; $D_j = |N_{x,j}x_{F,j} + N_{y,j}y_{F,j} + N_{z,j}z_{F,j} + N_j|$; $K_{i,j}$为任意指定常数, $i=1, 2, 3$.

$$(F_{FNDx,j}, F_{FNDy,j}, F_{FNDz,j}) = -(\dot{x}_{Fn,j}, \dot{y}_{Fn,j}, \dot{z}_{Fn,j})/R_{n,j} \tag{8}$$

其中, $R_{n,j}$为任意正常数, $(\dot{x}_{Fn,j}, \dot{y}_{Fn,j}, \dot{z}_{Fn,j})^{\mathrm{T}} = \mathrm{T}_{n,j}(\dot{x}_{F,j}, \dot{y}_{F,j}, \dot{z}_{F,j})^{\mathrm{T}}$,且

$$\mathrm{T}_{n,j} = \begin{bmatrix} (N_{x,j})^2 & N_{x,j}N_{y,j} & N_{x,j}N_{z,j}\\ N_{x,j}N_{y,j} & (N_{y,j})^2 & N_{y,j}N_{z,j}\\ N_{x,j}N_{z,j} & N_{y,j}N_{z,j} & (N_{z,j})^2 \end{bmatrix}$$

为动坐标系下的矢量在面 P_j法向上投影变换矩阵.

$$(F_{FTDx,j}, F_{FTDy,j}, F_{FTDz,j}) = -(\dot{x}_{Ft,j}, \dot{y}_{Ft,j}, \dot{z}_{Ft,j})/R_{t,j} \tag{9}$$

其中, $R_{t,j}$为任意正常数, $(\dot{x}_{Ft,j}, \dot{y}_{Ft,j}, \dot{z}_{Ft,j})^{\mathrm{T}} = \mathrm{T}_{t,j}(\dot{x}_{F,j}, \dot{y}_{F,j}, \dot{z}_{F,j})^{\mathrm{T}}$,且

$$\mathrm{T}_{t,j} = \begin{bmatrix} (N_{y,j})^2+(N_{z,j})^2 & -N_{x,j}N_{y,j} & -N_{x,j}N_{z,j}\\ -N_{x,j}N_{y,j} & (N_{x,j})^2+(N_{z,j})^2 & -N_{y,j}N_{z,j}\\ -N_{x,j}N_{z,j} & -N_{y,j}N_{z,j} & (N_{x,j})^2+(N_{y,j})^2 \end{bmatrix}$$

为动坐标系下的矢量在面 P_j切向上投影变换矩阵.

3.3 着陆腿与着陆脚点的相互作用

第 j个着陆脚的受力如图5所示,着陆器基体经由主着陆腿而作用到着陆脚点上的力为 $F_{Fj,1}$,辅助着陆腿产生的作用在着陆脚点上的力为 $F_{Fj,2}$.

把主辅着陆腿上的作用力沿着陆面的切向和法向分别投影,由力学平衡,并结合式(7)~式(9)可得着陆脚点的速度在着陆面切线和法线方向的表达式:

$$\left.\begin{aligned} (\dot{x}_{Fn,j}, \dot{y}_{Fn,j}, \dot{z}_{Fn,j}) &= R_{n,j}F_{FNS,j}(N_{x,j}, N_{y,j}, N_{z,j}) -\\ &\quad R_{n,j}(F_{Fnx,j}, F_{Fny,j}, F_{Fnz,j})\\ (\dot{x}_{Ft,j}, \dot{y}_{Ft,j}, \dot{z}_{Ft,j}) &= -R_{t,j}(F_{Ftx,j}, F_{Fty,j}, F_{Ftz,j}) \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

其中

$$(F_{Fnx,j}, F_{Fny,j}, F_{Fnz,j}) = \sum_{k=1}^{2}\mathrm{T}_{n,j}(F_{Fx,j,k}, F_{Fy,j,k}, F_{Fz,j,k})$$

$$(F_{Ftx,j}, F_{Fty,j}, F_{Ftz,j}) = \sum_{k=1}^{2}\mathrm{T}_{t,j}(F_{Fx,j,k}, F_{Fy,j,k}, F_{Fz,j,k})$$

3.4 着陆腿与着陆器基体的相互作用

第 j个着陆腿与着陆器基体的连接点为 $E_{j,k}$($k=1$,代表主着陆腿, $k=2$,代表辅助着陆腿),主辅着陆腿的交点为 R_j,则着陆腿的长度可表示为

$$\left.\begin{aligned} l_{j,1} &= [(x_{E,j,1}-x_{F,j})^2 + (y_{E,j,1}-y_{F,j})^2 +\\ &\quad (z_{E,j,1}-z_{F,j})^2]^{1/2}\\ l_{j,2} &= [(x_{E,j,2}-x_{R,j})^2 + (y_{E,j,2}-y_{R,j})^2 +\\ &\quad (z_{E,j,2}-z_{R,j})^2]^{1/2} \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

进而可得着陆腿的压缩行程:

$$S_{j,k} = l_{R,j,k} - l_{j,k} \tag{12}$$

式中, $l_{R,j,k}$为着陆腿初始长度.

因主着陆腿之缓冲减振器总是受到压缩作用,故 $S_{j,1} \geq 0$,而对于辅助着陆腿,因其缓冲减振器可作双向运用,故 $S_{j,2}$可取正值(压缩)或负值(伸长).

由计算得到的 $S_{j,k}$并对照图4所示的缓冲减振器的载荷变形曲线可以得到作用在着陆器基体上的作用力 $F_{Ex,j,k}$, $F_{Ey,j,k}$和 $F_{Ez,j,k}$.

则着陆腿作用到着陆器基体上总的作用力为

$$(F_{Ex}, F_{Ey}, F_{Ez}) = \sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{2}(F_{Fx,j,k}, F_{Fy,j,k}, F_{Fz,j,k}) \tag{13}$$

着陆腿作用到着陆器基体上总的作用力产生的转矩为

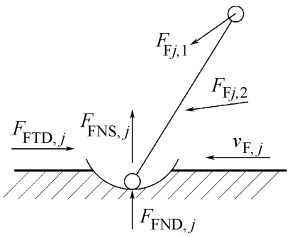


图5 第 j个着陆脚点受力图

$$\left.\begin{aligned} N_x &= \sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{2}(F_{Ez,j,k}y_{E,j,k} - F_{Ey,j,k}z_{E,j,k}) \\ N_y &= \sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{2}(F_{Ex,j,k}z_{E,j,k} - F_{Ez,j,k}x_{E,j,k}) \\ N_z &= \sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{2}(F_{Ey,j,k}x_{E,j,k} - F_{Ex,j,k}y_{E,j,k}) \end{aligned}\right\} \quad (14)$$

着陆器质心处的加速度为

$$(a_x, a_y, a_z) = (F_{Ex}, F_{Ey}, F_{Ez})/m \quad (15)$$

式中,m为着陆器的质量.

着陆器质心处的角加速度为

$$\left.\begin{aligned} \dot{\omega}_x &= \omega_y\omega_z(I_{xy} - I_{xz}) + N_x \\ \dot{\omega}_y &= \omega_x\omega_z(I_{yz} - I_{yx}) + N_y \\ \dot{\omega}_z &= \omega_x\omega_y(I_{xz} - I_{yz}) + N_z \end{aligned}\right\} \quad (16)$$

4　着陆过程受力分析计算流程

4.1　初始化

初始化位置参数包括:质心坐标(ξ_O, ζ_O, η_O),欧拉角(ψ, ϕ, θ),着陆脚点坐标$(x_{F,j}, y_{F,j}, z_{F,j})$,着陆腿与着陆器基体交点坐标$(x_{E,j,k}, y_{E,j,k}, z_{E,j,k})$,主辅着陆腿交点坐标$(x_{R,j}, y_{R,j}, z_{R,j})$;初始化速度参数包括:质心处速度$(v_{Ox}, v_{Oy}, v_{Oz})$,角速度$(\omega_{Ox}, \omega_{Oy}, \omega_{Oz})$;初始化常量包括:相对于动坐标系的转动惯量$I_x, I_y, I_z, I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}$;长度参数$a, b, d, l_1, l_2$;质量$m$;月球重力加速度$g$;着陆平面有关参数:平面单位法矢量$(N_{x,j}, N_{y,j}, N_{z,j})$和常量$N_j$;缓冲材料载荷-变形曲线有关参数:弹性极限对应的长度和载荷,压溃时对应的载荷.

4.2　计算时间增量Δt后的各项参数

对给定的Δt,计算此时着陆器质心的位置、速度、角速度、欧拉角、欧拉角速度(不独立参数,与角速度和欧拉角有关)、着陆脚点的位置、着陆腿与着陆器基体交点位置和着陆腿交点位置.

4.3　判断着陆脚与着陆面之间的关系

通过2.1节给出的判据判断着陆脚与着陆面之间的关系.若自由,则按自由刚体计算所对应的着陆脚的运动.若穿入,则由式(7)计算$F_{FNS,j}$,然后代入式(10)计算得到着陆脚点的速度,再由式(11)~式(12)计算着陆腿的压缩量,根据压缩量对照载荷-变形曲线得到着陆腿作用到着陆器基体上的作用力F_{Ex}, F_{Ey}, F_{Ez},最后由式(14)~式(16)计算的着陆器质心处的加速度、角加速度和着陆腿作用力对着陆器产生的转矩.下面给出关键的递推公式:

$$(x_{F,j}^{(n)} \quad y_{F,j}^{(n)} \quad z_{F,j}^{(n)})^{\mathrm{T}} = (x_{F,j}^{(n-1)} \quad y_{F,j}^{(n-1)} \quad z_{F,j}^{(n-1)})^{\mathrm{T}} + \Delta t(\dot{x}_{F,j}^{(n-1)} \quad \dot{y}_{F,j}^{(n-1)} \quad \dot{z}_{F,j}^{(n-1)})^{\mathrm{T}}$$

$$(\dot{x}_{Fn,j}^{(n)} \quad \dot{y}_{Fn,j}^{(n)} \quad \dot{z}_{Fn,j}^{(n)})^{\mathrm{T}} = R_{n,j}F_{FNS,j}^{(n-1)}(N_{x,j} \quad N_{y,j} \quad N_{z,j})^{\mathrm{T}} - R_{n,j}(F_{Fnx,j}^{(n-1)} \quad F_{Fny,j}^{(n-1)} \quad F_{Fnz,j}^{(n-1)})^{\mathrm{T}}$$

$$(\dot{x}_{Ft,j}^{(n)} \quad \dot{y}_{Ft,j}^{(n)} \quad \dot{z}_{Ft,j}^{(n)})^{\mathrm{T}} = -R_{t,j}(F_{Ftx,j}^{(n-1)} \quad F_{Fty,j}^{(n-1)} \quad F_{Ftz,j}^{(n-1)})^{\mathrm{T}}$$

$$l_{j1}^{(n)} = [(x_{E,j,1}^{(n)} - x_{F,j}^{(n)})^2 + (y_{E,j,1}^{(n)} - y_{F,j}^{(n)})^2 + (z_{E,j,1}^{(n)} - z_{F,j}^{(n)})^2]^{1/2}$$

$$l_{j2}^{(n)} = [(x_{E,j,2}^{(n)} - x_{R,j}^{(n)})^2 + (y_{E,j,2}^{(n)} - y_{R,j}^{(n)})^2 + (z_{E,j,2}^{(n)} - z_{R,j}^{(n)})^2]^{1/2}$$

$$S_{jk}^{(n)} = l_{R,jk}^{(n)} - l_{jk}^{(n)}$$

$$F_{FNS,j}^{(n)} = K_{1,j}D_j^{(n)} + K_{2,j}(D_j^{(n)})^2 + K_{3,j}(D_j^{(n)})^3$$

$$F_{Fnx,j}^{(n)}, F_{Fny,j}^{(n)}, F_{Fnz,j}^{(n)} = -\sum_{k=1}^{2}\mathrm{T}_{n,j}(F_{Fx,j,k}^{(n)}, F_{Fy,j,k}^{(n)}, F_{Fz,j,k}^{(n)})$$

$$(F_{Ftx,j}^{(n)}, F_{Fty,j}^{(n)}, F_{Ftz,j}^{(n)}) = -\sum_{k=1}^{2}\mathrm{T}_{t,j}(F_{Fx,j,k}^{(n)}, F_{Fy,j,k}^{(n)}, F_{Fz,j,k}^{(n)})$$

然后再重复4.2和4.3的过程,并得到整个着陆过程的动力学参数和着陆器在各个时刻的姿态.

5　结　论

1)通过着陆器简化模型,得到了着陆器准静态时着陆脚点和质心在惯性系中的位置表达式,当着陆器质心在惯性面$\xi\zeta$上的投影落于4个着陆脚点在同一平面上投影组成的四边形区域内时,着陆器稳定,反之,着陆器将发生翻倒.

2)通过分析着陆器着陆时瞬态的受力情况,得到了着陆器着陆瞬时的各项动力学参数的表达式,并结合标准试验机上得到的铝蜂窝载荷-变形曲线,得到着陆器质心处的速度加速度表达式.以此为依据,通过离散时间变量,给出了可以程序化实现整个动态着陆过程动力学模拟的计算过程.

参考文献 (References)

[1] Foing B H. The moon as a platform for astronomy and space science[J]. Advances in Space Research, 1996, 18(11): 17-23

[2] Surveyor 1[EB/OL]. NSSDC ID: 1966-045A. http://nssdc.gsfc.nasa.gov/database/MasterCatalog?sc=1966-045A

[3] Blanchard U J. Full-scale dynamic landing-impact investigation of a prototype lunar module landing gear[R]. Nasa TN D-5029, 1969: 1-41

[4] Basilevsky A T, Linkin V M. Lunar rover sample return: lunokhod/luna heritage and perspective[J]. Advances in Space Research, 1996, 18(11): 83-89

[5] Wubbo J O. EuroMoon 2000 a plan for a european lunar south pole expedition[J]. Acta Astronautica, 1997, 41(4-10): 579-583

[6] Walton W C, Durling B J. A procedure for computing the motion of a lunar-landing vehicle during the landing impact[R]. NASA TN D-4216, 1967: 1-27

(责任编辑:张　嵘)