基于最少能耗的飞行器着陆避障控制策略

王一凯^{①②}, 陈磊^{①*}, 裴哲浩^{①②}, 肖宇^{①②}, 何雅玲^①, 陶文铨^{①*}

① 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049;

② 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049

* 联系人, E-mail: chenlei@mail.xjtu.edu.cn; wqtao@mail.xjtu.edu.cn

2016-01-21 收稿, 2016-02-10 修回, 2016-02-16 接受, 2016-03-31 网络版发表

国家自然科学基金(51506159)和热流科学与工程教育部重点实验室开放基金资助

摘要 针对登月飞行器着陆粗避障和精避障阶段的策略控制问题, 本文基于软着陆动力学思想, 通过计算机仿真及模拟退火算法求解了避障段的最优燃料消耗控制策略. 以嫦娥三号登月为算例, 粗避障时, 首先将距月面2400 m数字高程图划分为100 m×100 m的子区域块, 并将标准化后的最高海拔、最低海拔、最小坡度角作为指标, 评价各子区域着陆安全度, 进而利用柯西隶属函数对各安全度定量评价, 绘出安全度灰度图; 然后将考虑燃料消耗作为优化的目标函数建立非线性规划模型, 采用模拟退火算法寻找最佳的落月位置, 并仿真绘出该阶段的下落轨迹, 求得嫦娥三号粗避障用时25.7 s, 耗油63.86 kg. 在粗避障操作基础上, 通过各发动机的脉冲组合调整使嫦娥三号水平飞行至最佳落月地点上方, 可实现精避障段的最优控制策略.

关键词 嫦娥三号, 避障阶段, 模拟退火, 子区域着陆安全度

登月飞行器的软着陆能力对国家经济发展、国家地位提高具有重要的现实意义. 飞行器在落月阶段需要对地形分析, 有效进行粗、精两次接力避障, 保证其成功落在安全区域; 同时, 在避障阶段实现燃料消耗最优也尤为重要, 以使得飞行器在落月后开展一系列研究工作以及弹射返回的顺利进行. Moon等人^[1]从最小推动力角度研究了登月飞行器的轨迹和优化配置问题; Wu等人^[2]基于嫦娥3号图像数据、LRO NAC数据和LOLA数据分析月球表面地形并通过火山口形态学以及地形测量学精确定位嫦娥3号着陆位置; Xu等人^[3]就精避障段避开最多尘埃释放漫游器进行了研究; Lunghia等人^[4]设计了半分析导航算法提高飞行器导航自动化程度以实现流畅安全着陆; Kozynchenko^[5]通过预测制导算法提高最大剩余部分的可用推力边距以提高飞行器的避障能力; 王瞭等人^[6]利用遗传算法实现了推力幅值恒定的登月飞行

器软着陆轨道的优化, 但其在避障阶段的控制策略一带而过; 徐敏等人^[7]考虑燃料最省, 实现了通过两次制动的登月变轨控制, 文中忽略了飞行器落月的避障控制, 也没有考虑月球复杂地形因素; 单永正等人^[8]在忽略避障环节后成功实现月面软着陆, 并且比传统的打靶法燃料消耗少2.1%; 张洪华等人^[9]中基于螺旋搜索法给出了嫦娥三号自主避障控制技术, 这种搜索方式对嫦娥三号进入避障段的初始位置要求较高, 难以解决嫦娥三号开始处于大范围复杂地形上方的情形; 占日新^[10]设计了驱动系统在未知环境下的避障算法, 并验证了其有效性; 吴伟仁等人^[11]利用阴影分割法选取登月飞行器着陆区, 并跟踪选好的特征点序列实现落月导航, 但其寻找合适登月区的指标单一, 局限性较大; 田林等人^[12]考虑结合飞行器参数, 设计了人控避障控制方案, 包括地形观测、辅助决策和人控. 此外, 上述着眼于登月避

引用格式: 王一凯, 陈磊, 裴哲浩, 等. 基于最少能耗的飞行器着陆避障控制策略. 科学通报, 2016, 61: 1488–1494

Wang Y K, Chen L, Pei Z H, et al. The control strategy of Lunar landing craft avoiding obstacles with minimum fuel consumption (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1488–1494, doi: 10.1360/N972016-00096

障着陆的文献均没有将燃料消耗最省考虑在内,而为满足飞行器避障落月后的月球表面工作需要以及弹射返回需要,对避障段能耗的优化不容忽视。

本文在上述文献研究成果的基础上,实现了登月飞行器落月避障阶段自动选取安全登月位置,基于最小燃料消耗实现理想避障着陆,并以嫦娥三号作为算例,给出了详细的计算过程和落月结果。避障阶段分为粗避障和精避障两段,其中粗避障使飞行器落至大致安全区域的上空,精避障进一步提高对地形识别的精确度,使飞行器安全着陆。此外,本文还对安全评价指标的权重进行误差分析和优化。

1 粗避障段的最优控制策略

为使嫦娥三号最终降至月球表面时可以避开陨石坑、岩石、断层与较陡的坡地,并合理调动各姿态调整发动机以减少能源消耗,需要探求嫦娥三号在粗避障段的最优控制策略。下面通过评价地面安全程度,模拟退火^[13]寻求最佳着陆位置,计算能源消耗这三个步骤,完成粗避障段最优策略的求解。

1.1 粗避障调控优化模型

(i) 综合评价地面安全程度。基于距月球2400 m处的数字高程图,嫦娥三号首先需要在月球表面寻求安全着陆子区域,即较为平坦且无较大陨石坑和断层的100 m×100 m子区域。因此,为评价月球表面各区域的安全程度,综合考虑海拔、坡度等因素。

取 Ω 为距月球2400 m处的数字高程图中任一100 m×100 m子区域,设子区域 Ω 内最高海拔为 $h_{\max}$,最低海拔为 $h_{\min}$,定义子区域 Ω 的最小可能坡角 i 的表达式为

$$i = \arctan \left(\frac{h_{\max} - h_{\min}}{100\sqrt{2}} \right). \quad (1)$$

设距月球2400 m处的数字高程图中最高海拔为 $H_{\max}$,最低海拔为 $H_{\min}$ 。采用极差变换法^[14]对各子区域的 $h_{\max}$ 进行标准化处理,设标准化后的结果为 $\tilde{h}_{\max}$ 。为避免嫦娥三号落入陨石坑中,即各子区域的 $h_{\min}$ 不能过小,因此将 $h_{\min}$ 进行反向标准化,设标准化结果为 $\tilde{h}_{\min}$,其表达式为

$$\tilde{h}_{\min} = \frac{H_{\max} - h_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}}. \quad (2)$$

同理,对子区域 Ω 的最小可能坡角 i 进行标准化,

设标准化结果为 $\tilde{i}$,由于坡度角 i 不超过 $\pi/2$,因此将 i 与 $\pi/2$ 的比值作为标准化后的最小可能坡角 $\tilde{i}$ 。

为使嫦娥三号最终降至月球表面时可以避开陨石坑、岩石、断层与较陡的坡地,应使得标准化后的三个参数 $\tilde{h}_{\max}$, $\tilde{h}_{\min}$ 和 $\tilde{i}$ 均尽可能小。设子区域 Ω 的着陆安全度为 D ,定义其表达式为

$$D = 1 - \frac{1}{3} (\tilde{h}_{\max} + \tilde{h}_{\min} + \tilde{i}). \quad (3)$$

标准化后的三个参数 $\tilde{h}_{\max}$, $\tilde{h}_{\min}$ 和 $\tilde{i}$ 均属于 $[0,1]$,且越小,对应子区域越满足着陆要求。根据 D 的定义表达式,可知 $D \in [0,1]$,且 D 越接近1,说明在子区域 Ω 着陆越安全。按各子区域的安全状况,将其分为禁止着陆区,不适于着陆区,勉强着陆区,适于着陆区和理想着陆区五类,并按1~5标号。利用 $D_x (x=1, \dots, 5)$ 定量描述五类子区域的安全度,对于偏大型柯西分布隶属函数^[15]:

$$D_x = \begin{cases} \left[(1 + \eta(x - \mu)^{-2})^{-1} \right], \\ a \ln(x) + b, \end{cases} \quad (4)$$

令 $D_1=0.1$, $D_3=0.4$, $D_5=0.75$,得参数: $a=0.273$, $b=0.100$, $\eta=4.69$, $\mu=1.23$,进而得到 $D_2=0.289$, $D_4=0.62$ 。因此,当子区域 Ω 的着陆安全度 D 大于等于0.62时,则认为嫦娥三号可以将此子区域视为较好的落月地点。

(ii) 模拟退火寻求最佳着陆位置。由于在粗避障段,嫦娥三号行驶轨迹弧度较小,为寻求最优燃料策略,不需实时控制行驶方向和受力情况。假设在这一阶段,嫦娥三号以加速、匀速和减速三种方式依次下落,嫦娥三号朝着着陆位置行驶时行驶方向与水平面的夹角为 θ 。设嫦娥三号在此阶段初始速度为 v_0 。设加速下落时,所用时间为 t_1 ,减速主推动器推力为 F_1 ;匀速下落时,速度为 v_m ,所用时间为 t_2 ,减速主推动器推力为 F_2 ;加速下落时,所用时间为 t_3 ,减速主推动器推力为 F_3 。设比冲恒为 v_e 。为使燃料消耗最少,建立目标函数,其表达式为

$$f = \min \left(\int_0^{t_1} \frac{F_1}{v_e} dt + \int_{t_1}^{t_1+t_2} \frac{F_2}{v_e} dt + \int_{t_1+t_2}^{t_1+t_2+t_3} \frac{F_3}{v_e} dt \right). \quad (5)$$

由于粗避障段的范围为距离月球表面2.4 km至100 m之间,共计2300 m,进一步结合运动学关系,得其约束条件满足:

$$\begin{cases} (mg - F_1 \sin \theta) t_1 = m(v_m - v_0) \sin \theta, \\ mg - F_2 \sin \theta = 0, \\ (F_3 \sin \theta - mg) t_3 = mv_m \sin \theta, \\ \frac{mv_m^2}{2(mg - F_1 \sin \theta)} + v_m t_2 \sin \theta + \frac{mv_m^2}{2(F_3 \sin \theta - mg)} = 2300. \end{cases} \quad (6)$$

为在所有安全着陆子区域找到最佳选择, 以使得燃料消耗最优, 即目标函数 f 最小, 采用模拟退火法进一步求解 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 着陆位置.

为加快模拟退火算法的求解收敛速度, 采用蒙特卡罗法寻求一个较安全的着陆子区域作为初始解. 由于初始时刻嫦娥三号在月球表面的垂直投影位于 $2300 \text{ m} \times 2300 \text{ m}$ 区域的中心位置, 因此初始解选在中心位置附近.

退火过程中的新解由当前最优着陆安全子区域所在位置随机抖动的方法产生, 即在当前最优解附近随机选取坐标 (x, y) , 作为新的着陆子区域的左下角坐标. 若新着陆子区域的安全程度 D 大于等于 0.62, 则进一步求解嫦娥三号在粗避障段所消耗的燃料 f , 记代价函数差, 即新解所得的消耗燃料与当前最优燃料消耗的差为 Δf . 取模拟退火算法的接受概率表达式为

$$P = \begin{cases} 1, & \Delta f < 0, \\ \exp(-\Delta f/T), & \Delta f > 0. \end{cases} \quad (7)$$

如果 $\Delta f < 0$, 则接受新解; 否则, 以 $\exp(-\Delta f/T)$ 的概率接受新解, 即若 $\exp(-\Delta f/T)$ 大于 0 到 1 之间的随机数则可接受新的 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 着陆子区域.

利用选定的降温系数 $\alpha = 0.999$ [16] 进行降温, 即 $T_n = T_{n-1} \alpha$, 其中 T_n 为第 n 次退火后的温度. 并用选定的终止温度 $E = 10^{-30}$ 以判断退火过程是否结束, 即当 $T < E$ 时, 算法结束并输出当前最优 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 着陆安全子区域和嫦娥三号在粗避障段所消耗的最少燃料 f .

1.2 模型求解与结论

(i) 综合评价地面安全程度. 基于距月球 2400 m 处的数字高程图, 可按照模型对任一 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 子区域 Ω 进行评价. 为初步得到评价结果, 首先将数字高值图初步分为 23×23 的子区域方阵, 根据 D 的定义表达式, 计算得到每一个子区域的安全程度, 并通过灰度图像进行直观展示. 距月球 2400 m 观测所得地形的等高线图和安全程度灰度图如图 1 和 2 所示.

图 1 为嫦娥三号在距月球表面 2400 m 所拍摄的地形图对应的等高线图. 图 2 中, 白色方框所围部分表示着陆安全度 D 大于等于 0.62 的子区域, 其中 D 的计算表达式采用中优化后的结果, 即将三个指标权重分别调整至 0.73, 0.93 和 0.65.

(ii) 模拟退火寻求最佳着陆位置. 由于将数字高值图初步分为 23×23 的子区域方阵并不精确, 应考虑数字高值图中所有可能的 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 子区域, 则满足着陆安全度 D 大于等于 0.62 的子区域数目将更为庞大. 为在众多安全着陆子区域求得最佳选择, 以使得燃料消耗最优, 采用模拟退火法进一步求解着陆位置.

为观察模拟退火算法对寻找最佳着陆子区域的可行性, 在求解初始时刻嫦娥三号在 $2300 \text{ m} \times 2300 \text{ m}$

图 1 粗避障阶段地形等高线图

Figure 1 Contour of the coarse obstacle avoidance

图 2 粗避障阶段安全程度灰度图

Figure 2 Safety greyscale image of the coarse obstacle avoidance

区域的中心位置后,考虑初始位置在其他点时的退火结果.相关结果如表1所示,其中“着陆子区域坐标”表示100 m×100 m着陆子区域中心的坐标位置.

得到不同初始位置所对应的100 m×100 m着陆子区域位置和耗油量后,通过计算及仿真的方法直观描绘出嫦娥三号在粗避障段下降轨迹,如图3所示.图3中水平分辨率为1 m/像素,高度数值单位为1 m,圆圈表示嫦娥三号的末位置,方框表示其中间过程位置,白色叉号表示嫦娥三号在精避障后的垂直投影位置.

当嫦娥三号以57 m/s的速度进入粗避障段且初始位置为(1100, 1100, 2493)时,其最佳100 m×100 m着陆子区域的中心坐标位置为(1101, 1101, 193),其中坐标单位为m.通过对加速下落时间 t_1 、匀速下落时间 t_2 和加速下落时间 t_3 求和,可得到粗避障段总耗时25.7 s.由表1可知,最优消耗燃料63.86 kg.

2 精避障段的最优控制策略

为使嫦娥三号降至月球表面时可以精确地避开较小的陨石坑,并合理调动各姿态调整发动机以减少能源消耗,需要探求飞嫦娥三号在精避障段的最优控制策略.求解嫦娥三号在精避障段的控制策略

表1 模拟退火算法结果

Table 1 Results of the simulated annealing

初始位置 坐标(m)	模拟 退火 次数	着陆区域 坐标(m)	区域 安全 程度	耗油量 (kg)
(1100,1100,2493)	69044	(1101,1101,193)	0.69	63.86
(1,1500,2500)	67305	(236,2106,192)	0.63	77.60
(1500,500,2495)	69765	(1603,500,205)	0.63	81.91

图3 粗避障段下落仿真图(单位: m)

Figure 3 Landing simulation of the coarse obstacle avoidance (Unit: m)

方式与“粗避障段的最优控制策略”求解相似.

基于距月球100 m处的数字高程图,嫦娥三号需要在月球表面精确寻求安全着陆子区域,考虑到嫦娥三号的大小参数和着陆后月球车的行驶空间大小,将嫦娥三号精确寻得的安全着陆子区域选为平坦且无小陨石坑的10 m×10 m子区域.同样,采用标准化后的最高海拔 $\tilde{h}_{\max}$ 、最低海拔 $\tilde{h}_{\min}$ 和最小可能坡角 $\tilde{i}$ 三个指标衡量子区域的着陆安全程度 D .

通过着陆安全程度 D 表达式,计算得到每一个子区域的安全程度,并通过灰度图像进行直观展示.距月球100 m观测所得地形的等高线图和安全程度灰度图如图4和5所示.图5中白色方框所围部分表示着陆安全度 $D \geq 0.56$ 的子区域.

由于精避障段中安全着陆位置的选取对嫦娥三号后续任务的保证尤为重要,且精避障段的范围区间仅长70 m,时间和燃料消耗总量相比之前各个阶段可以忽略不计.因此,应尽可能提高着陆位置的安全程度,而忽略嫦娥三号在此阶段对时间和燃料消耗的控制.

提高对着陆安全程度 D 的要求至0.575时,可最终得到两个最安全着陆10 m×10 m子区域,其中心位置坐标分别为(35, 15, 35)和(55, 85, 38),单位m.因此有两个着陆方案可供选择.与粗避障段不同,此阶段要求嫦娥三号首先平移至安全着陆子区域上空,再垂直降落.通过计算机仿真法得到嫦娥三号在精避障段两个方案的降落轨迹,如图6所示.

图6中水平分辨率为0.1 m/像素,高度数值单位为0.1 m,圆圈表示嫦娥三号的初末位置,方框表示

图4 精避障阶段地形等高线图

Figure 4 Contour of the precise obstacle avoidance

图5 精避障阶段安全程度灰度图

Figure 5 Safety greyscale image of the precise obstacle avoidance

图6 精避障段下落仿真图(单位 0.1 m)

Figure 6 Landing simulation of the precise obstacle avoidance (Unit: 0.1 m)

其中间过程位置,白色叉号表示嫦娥三号在精避障后的垂直投影位置.由图6可知,嫦娥三号在精避障段首先水平调至最理想的10 m×10 m安全着陆子区域上空,再通过合理控制多个发动机的脉冲组合调整姿态,使嫦娥三号水平速度降为0,最终垂直降落至月面上空30 m.

当嫦娥三号进入精避障段且初始位置为(50, 50, 211)时,得到两个最理想10 m×10 m子区域,其中心位置坐标分别为(35, 15, 35)和(55, 85, 38),坐标单位为m.

3 着陆子区域安全度的误差分析

基于前文子区域安全度 D 的定义,通过标准化后的最高海拔 $\tilde{h}_{\max}$,最低海拔 $\tilde{h}_{\min}$ 和最小可能坡角 $\tilde{i}$ 这三个指标衡量子区域的着陆安全程度,整体上满足要求.但由于较大的盆地子区域 $\tilde{h}_{\min}$ 过于接近1而 $\tilde{h}_{\max}$ 和 $\tilde{i}$ 均接近0,各个指标值优劣程度不均,因此

盆地个别子区域出现错判的现象.以理想着陆子区域错判率 σ 衡量误差的大小, σ 为求得理想着陆子区域数目中错判子区域与区域总数的比值.

认为子区域 Ω 出现错判当且仅当其所对应的安全度 D 大于等于0.62,且其 $\tilde{h}_{\max}$, $\tilde{h}_{\min}$ 和 $\tilde{i}$ 中至少一个指标大于0.9.调整指标权重前,错判率 σ 为2.2%.不断随机调整三个指标的权重,并计算相应的错判率 σ ,部分随机结果及错判率如表2所示.

通过比较各随机结果对应的错判率,最终得到修正盆地错判问题后的子区域安全度 D' 表达式为

$$D' = 1 - \frac{1}{2.31} \left(0.73\tilde{h}_{\max} + 0.93\tilde{h}_{\min} + 0.65\tilde{i} \right), \quad (8)$$

式中,子区域内标准化后的最低海拔 $\tilde{h}_{\min}$ 所对应权重较大,其他两个指标对应权重较小.修正后的子区域安全度 D' 可有效解决盆地子区域错判问题.

4 结论

本文为实现登月飞行器落月避障阶段的最优能耗策略,通过对粗避障段和精避障段分别进行多指标评价安全度评价,选择安全着陆子区域,并建立以能源消耗为目标函数的非线性规划模型,采用模拟退在安全着陆子区域中寻求最优解.本文以嫦娥三号作为算例,得到结论如下:

(1) 在嫦娥三号登月粗避障阶段中,基于距月球2400 m处的数字高程图,嫦娥三号首先需要在月球表面寻求安全着陆子区域,即较为平坦且无较大陨石坑和断层的100 m×100 m子区域.综合考虑海拔、坡度等因素,用着陆安全度 D 评价月球表面各区域的安全程度.求解非线性规划模型得,当嫦娥三号以57 m/s的速度进入粗避障段且初始位置为(1100, 1100, 2493)时,其最佳100 m×100 m着陆子区域的中心坐标位置为(1101, 1101, 193),此着陆对应的子区域安

表2 各指标权重随机结果及错判率

Table 2 Random results of the weights and their corresponding error rates

指标1	指标2	指标3	权重和	错判率
0.91	0.68	0.83	2.42	3.1%
0.88	0.81	0.67	2.36	1.8%
0.72	0.78	0.73	2.23	1.6%
0.73	0.93	0.65	2.31	0.2%

全度为0.69, 且粗避障段总耗时25.7 s, 最优消耗燃料63.86 kg.

(2) 飞行器在精避障段的时间和燃料消耗总量相比之前各个阶段忽略不计. 此阶段设定着陆安全程度的数值为0.575. 嫦娥三号进入精避障段(50, 50, 211)坐标处的初始位置后, 首先水平调至最理想的安全着陆子区域上空, 再通过合理控制多个发动机的脉冲组合调整姿态, 使嫦娥三号水平速度降为0,

最终垂直降落至月面上空30 m. 通过计算机仿真发现两个100 m×100 m最安全着陆子区域可供选择, 其中心位置坐标分别为(35, 15, 35)和(55, 85, 38).

(3) 着陆子区域的最高海拔、最低海拔和最小可能坡角这三个指标的权重会影响着陆安全程度, 分别调整三个指标大小为0.73, 0.93, 0.65后, 着陆安全程度错判率降低至0.2%, 可近似认为不出现着陆安全度的错判.

参考文献

- 1 Moon Y, Kwon S. Lunar soft landing with minimum-mass propulsion system using H_2O_2 /kerosene bipropellant rocket system. *Acta Astronaut*, 2014, 99: 153–157
- 2 Wu B, Li F. Topographic modeling and analysis of the landing site of Chang'E-3 on the Moon. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 405: 257–273
- 3 Xu M, He Y C. Terminal guidance strategy for a hybrid thrust-tether lunar landing scheme. *Adv Space Res*, 2015, 55: 2280–2292
- 4 Lunghi P, Lavagna M, Armellini R. A semi-analytical guidance algorithm for autonomous landing. *Adv Space Res*, 2015, 55: 2719–2738
- 5 Kozynchenko A I. Enhancing the manoeuvring capabilities of a lunar landing module using predictive guidance algorithms. *Acta Astronaut*, 2010, 67: 406–416
- 6 Wang J, Li J F, Cui N G, et al. Genetic algorithm optimization of lunar probe soft-landing trajectories (in Chinese). *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 2003, 43: 1056–1059 [王瞭, 李俊峰, 崔乃刚, 等. 登月飞行器软着陆轨道的遗传算法优化. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43: 1056–1059]
- 7 Xu M, Li J F. Optimal control of lunar soft-landing (in Chinese). *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 2001, 41: 87–89 [徐敏, 李俊峰. 月球探测器软着陆的最优控制. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41: 87–89]
- 8 Shan Y Z, Duan G R, Lü S L. Optimal control for soft-landing of lunar probe (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 2009, 17: 2153–2158 [单永正, 段广仁, 吕世良. 月球探测器软着陆的最优控制. 光学精密工程, 2009, 17: 2153–2158]
- 9 Zhang H H, Liang J, Huang X Y, et al. Autonomous soft-landing technology for Chang-e'3 (in Chinese). *Sci Sin Technol*, 2014, 44: 559–568 [张洪华, 梁俊, 黄翔宇, 等. 嫦娥三号自主避障软着陆控制技术. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 559–568]
- 10 Zhan R X. Research on obstacle for driving system of planet explorer based on fuzzy control (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008 [占日新. 基于模糊控制的星球探测器驱动系统避障研究. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2008]
- 11 Wu W R, Wang D Y, Li J, et al. Lunar soft-landing guidance study (in Chinese). *Sci Sin Inform*, 2011, 41: 1054–1063 [吴伟仁, 王大轶, 李骥, 等. 月球软着陆避障段定点着陆导航方法研究. 中国科学: 信息科学, 2011, 41: 1054–1063]
- 12 Tian L, Qi F R, Guo L L, et al. Study of terrain hazard detection and avoidance scheme for human lunar landing (in Chinese). *Space Recov Remote Sens*, 2014, 35: 11–19 [田林, 戚发轫, 果琳丽, 等. 载人月面着陆地形障碍探测与规避方案研究. 航天返回与遥感, 2014, 35: 11–19]
- 13 Yang W B. Improved simulated annealing algorithm for TSP (in Chinese). *Comput Eng Appl*, 2010, 46: 34–36 [杨卫波. 求解 TSP 问题的改进模拟退火算法. 计算机工程与应用, 2010, 46: 34–36]
- 14 Li M J. Study of index standardization in overall evaluation (in Chinese). *Chin Manage Sci*, 2004, 12: 45–48 [李美娟. 综合评价中指标标准化方法研究. 中国管理科学, 2004, 12: 45–48]
- 15 Wang J F, Lu Z D. Determination of membership function in fuzzy control (in Chinese). *Henan Sci*, 2000, 18: 348–351 [王季方, 卢正鼎. 模糊控制中隶属度函数的确定方法. 河南科学, 2000, 18: 348–351]
- 16 Zheng P, Zhou H X, Yu K G, et al. Application of simulated annealing in solving the inverse problem of line heat sources (in Chinese). *J China Univ Metrol*, 2010, 21: 246–250 [郑朋, 周杭霞, 於可广, 等. 模拟退火算法在线热源反问题数值求解中的应用. 中国计量学院学报, 2010, 21: 246–250]

The control strategy of Lunar landing craft avoiding obstacles with minimum fuel consumption

WANG YiKai^{1,2}, CHEN Lei¹, PEI ZheHao^{1,2}, XIAO Yu^{1,2}, HE YaLing¹ & TAO WenQuan¹

¹ Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

² School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

A comprehensive evaluation method and its terminal control strategy based on a simulated annealing algorithm are presented in this paper, which have application in avoiding the obstacles for lunar soft landing. Unlike many fuel-irrelevant researches or some classical strategies only concluding the routes, an innovative strategy considering the minimum fuel consumption and the obstacle avoidance strategy together is proposed, in view of a dynamics theory for minimum fuel consumption and computer simulation. The combined process consists of a coarse obstacle avoidance and a precise one, and in this paper, we take Chang-e'3 for example—all the following data and craft structures are based on Chang-e'3. Firstly, in order to optimize the algorithm for avoiding obstacles during the landing process, we need to create an index system to evaluate the degree of safety of the whole area divided into several sub-blocks. In the coarse obstacle avoidance section, at first, the digital picture taken from an elevation of 2400 m above the surface is divided into 100 m×100 m sub-blocks, and “the highest elevation”, “the lowest elevation”, “the minimum slope angle” are set as three indicators evaluating the landing safety of each area. The safety greyscale image can be drawn and the safety degree can be evaluated quantitatively by Cauchy membership function. Secondly, we develop a control scheme with high computational efficiency and apply it to select the safest landing area automatically. Taking the computational simulated trajectory into consideration, we adapt the simulated annealing algorithm to obtain the better landing area, in the process of which, a nonlinear programming model is introduced with the object function of minimum fuel consumption. With the parameters of the simulated annealing algorithm—the cooling coefficient $\alpha=0.999$ and the terminal temperature $E=10^{-30}$, the program nicely finishes with a high time efficiency. The entire operation of trajectory simulating, the safest landing area analyzing, the obstacle avoidance, the descent stages transforming and the comprehensive consideration of minimum fuel consumption are all based on computational simulation. Thirdly, according to the algorithm simulation, the landing trajectory including a specific landing coordinate is obtained. It takes 25.7 s for Chang'e-3 to complete the soft landing of coarse obstacle avoidance, with 63.86 kg fuel consumption. We also simulate with a given change of the initial conditions, in order to test and verify the validity of the algorithm, and results turn out to be very desirable. Similarly, the optimal control strategy for precise obstacle avoidance is also obtained, and in this section, the time cost and fuel consumption are both negligibly small. Finally, we focus on the error rate of the algorithm and provide a method to diminish the error rate—by adjusting weights of the three indicators which are used to evaluate the safety of sub-blocks. The algorithm can better deal with the effect of topographic diversity.

Chang'e-3, obstacle avoidance, simulated annealing, sub-blocks safety

doi: 10.1360/N972016-00096