

月球极区水冰开采热管阵列布局设计方法

赵嘉龙, 袁 帅, 张泽旭

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对月球极区水冰原位资源开采问题, 提出一种热管阵列布局设计方法。根据水冰开采方案给出了热管阵列, 用三维有限差分方法对热管阵列进行热传导数值解算; 建立采水量与热流消耗的目标函数, 利用遗传算法对热管阵列布局进行优化, 迭代搜索出热管布局的最优解。仿真实验表明, 提出的热管阵列布局优化方法能够以最小的热流消耗获得最大的采水量, 并给出一次任务能够收集的水冰质量和所需总时间。将这一设计方法应用于月球基地生命保障系统, 可提高极地原位资源的采集效率。

关键词: 水冰开采; 热管阵列; 遗传算法; 最优化问题

中图分类号: V57

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)05-0494-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220047

引用格式: 赵嘉龙, 袁帅, 张泽旭. 月球极区水冰开采热管阵列布局设计方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(5): 494-502.

Reference format: ZHAO J L, YUAN S, ZHANG Z X. Design method of heat pipe array's layout for lunar polar water ice mining[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(5): 494-502.

引言

月球具有特殊的空间位置, 可以作为太阳系行星探测的中转站, 为行星登陆试验提供平台; 而且, 月球矿藏众多, 能源丰富, 开发月球原位资源可以带来巨大的经济效益, 因此月球成为了近年来人类深空探测活动的关键目标。2009年, 美国发射了月球勘测轨道器LRO, 其上搭载的月球遥感卫星LCROSS进行了永久阴影区的撞击实验, 所得数据为月球极区存在固态水冰提供了合理依据。水冰原位资源作为重要的物质原料, 在月球基地任务中起到非常关键的作用^[1-2]。开采月球极区水冰获得的水资源可用来制备氢和氧, 前者可作为清洁能源如氢燃料电池, 也可用作月面飞行器的燃料; 后者可用于生保系统, 维持航天员的生命活动, 也可作为火箭的助燃剂使用。此外, 也可将开采得到的水冰制备成液态水, 为月球基地提供饮用水的基本保障, 因此, 对月球极区水冰开采相关问题进行深入研究, 能够有力地支撑未来驻人月球基地的建设。

目前世界各国提出的水冰开采方案主要集中为两个思路: 挖掘式开采、加热式开采。挖掘式开采普遍使用带有深沟槽的钻头深入月壤, 并将挖掘出的月壤

储存在深沟槽中, 再转运至存储罐, 运输回月球基地, 而后将水冰和月壤中其它物质进行分离。这种挖掘方法设计简便, 缺点是一个工作周期采水量较少, 且受分离装置效率的影响较大。加热式开采的方法是在采水区域布置加热器阵列, 加热模式可选择电加热、微波加热, 或将太阳能导入深坑, 用光能进行加热。水冰受热升华为水蒸气, 在月表被气体捕集装置收集, 完成开采的过程。这种加热法采水效率较高, 但需要考虑热量的来源, 并预估所需总热量的数值。

文献[3-4]分析了月球水冰赋存形态和分布情况, 列举了各航天大国在月球水冰探测方面所提出的计划, 对水冰开采所涉及的关键技术^[5]进行了说明。

文献[6]提出了月壤表层加热和插入加热器进行次表层加热两种方案, 比较了两种方案在不同条件下的采水效果, 并且对加热时间进行了计算。但是加热器以矩阵的形式分布, 这种布局方式下月壤的受热效果是否最佳, 还需要经过后续验证。

文献[7]依据加热开采水冰的方案, 通过数学建模获取了月壤最优受热温度, 比较了3种加热器布局方式, 基于能量利用率选择了其中最佳的一种, 但从给定方案中筛选得出的布局结果不具有全局性、普遍性, 缺乏搜索、迭代的过程。

文献[8]基于ISRU原位资源开发系统^[9], 设计了一种钻取一体化的采水机构, 为提高加热效果, 减少能耗, 对加热器和钻头的内部结构进行了调研、优化。但未涉及到加热器在采水区域的布局问题。

本文提出利用热管阵列对水冰进行加热、开采的方案: 将陨石坑顶近永久光照区的太阳光导入坑底永久阴影区的采水区域, 而后, 采水机构安装的光热收集器吸收太阳辐射, 并将太阳光的热量传递给其下方的热管阵列, 热管阵列展开成某一布局方式, 通过螺旋钻(热管嵌入钻头内部)侵入月壤, 穿过月壤表层, 进入次表层, 利用热管冷端释放的热量加热月壤次表层的固态水冰。一段时间后, 水冰受热升华形成水蒸气, 采水机构的绝热捕集罩张开, 捕获、聚拢产生的水蒸气, 防止逸散, 捕集罩内的水蒸气通过导管进入冷凝储存器, 在低温下凝华为固态水冰, 完成水冰的收集。该方案实现了月球水冰加热和收集的一体化, 其总体设计如图1所示。

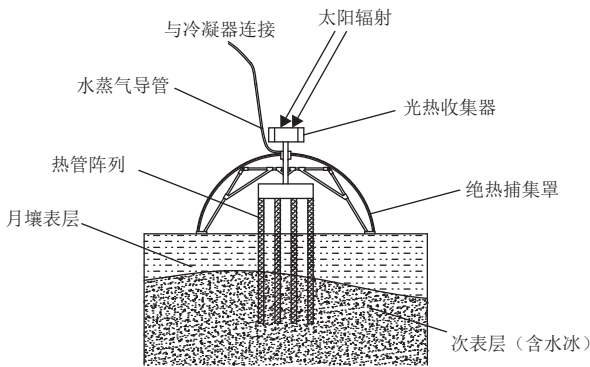


图1 水冰开采方案总体设计
Fig. 1 Overall design of water ice mining scheme

在本方案的实施过程中, 热管阵列的布局直接影响着采水区域的受热情况与温度分布, 不合适的热管布局方式会使月壤受热不均, 即局部温度过高而其他区域受热较少, 造成部分区域温度达不到水冰升华点^[10](真空下为200 K), 进而导致固态水冰难以升华成水蒸气进入捕集罩, 削减了加热过程的总采水量, 降低了收集水冰的效率。

因此, 本文针对月球极区水冰开采的关键环节—热管阵列布局, 利用遗传算法进行优化与仿真, 在兼顾采水总量和热管能耗的条件下, 搜索并找出热管阵列布局的最优解。

1 热管阵列导热过程模拟

1.1 热管布局方式

设计热管横截面积 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$, 总长度 1 m , 吸热段长度 0.3 m , 绝热段 0.4 m , 放热段 0.3 m , 工作温

度 $T_w = 400\text{ K}$, 以接触热传导的方式对月壤进行加热, 热管阵列所含热管数量记为 n 。划定 $3.2\text{ m} \times 3.2\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 的采水区域, 深度 0.3 m 指的是从月表以下 0.7 m 至 1.0 m 这段区域。为进行月壤热传导的仿真计算, 将上述区域划分成点云, 空间步长 0.05 m , 即得到 $64 \times 64 \times 6$ 共24 576个点, 每个点可看作导热过程中温度变化的最小单位, 代表温度矩阵的一个元素, 用作传热分析和采水量计算。点云中相邻两点的间距为 0.05 m , 即一个空间步长, 根据所设定的热管尺寸, 一支热管在 x - y 平面占据 4×4 的空间, 热管放热段在 z 方向完全占满。如果将 x - y 平面 4×4 的点集看作一个网格, 则点云的二维投影可视为 16×16 的网格组, 本文根据这一网格组设计热管布局的规则: 每个网格代表热管布局的一个位置, 网格对应的数字按从下至上, 从左至右的顺序定为 $1 \sim 256$, 作为热管布局位置的编号。图2展示了 $n = 7$ 时某一布局下各热管的编号(浅蓝色区域为热管所在位置)。

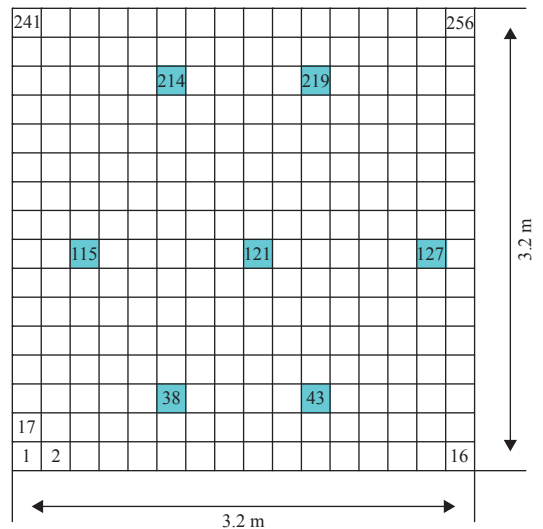


图2 网格划分及热管位置编号规则
Fig. 2 Mesh division and numbering rules of heat pipe positions

1.2 采水区域参数分析

根据美国LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) 探测器所得的撞击实验数据, 沙克尔顿(Shackleton)陨石坑的光谱反射率相对较高, 说明陨坑的永久阴影区内含水概率较大, 容易开采出较多的固态水冰资源^[11], 故本文开采月球水冰选址在月球南极Shackleton陨石坑的永久阴影区, 陨石坑中心月面坐标为(89.67°S, 129.78°E)。提取采水区域的关键物理参数和重要经验公式如表1所示, 为月壤热传导模型的建立以及遗传算法的执行提供原始数据。其中, 水冰并非均匀分布于月壤, 本文以水冰体积百分

比5%为均值, 方差1.5%, 作随机的高斯分布, 赋予每个网格不同的水冰体积分数 λ_i 。另外, 采水区域内, 月壤热导率的数值与局部含冰量有关, 本文根据文献[12]对平均粒径0.01 mm冻土的实测数据, 作出线性回归拟合, 拟合结果见表1, 线性项的95%置信区间为(2.546, 3.134), 常数项95%置信区间(0.541 6, 0.666 4)。

表1 水冰开采区域关键物性参数

Table 1 Key physical parameters of water ice mining area

物性参数	符号	数值
采集区域横截面积/m ²	S	$3.2^2 = 10.24$
采集区域深度范围/m	d	0.7~1.0
水蒸气导管横截面积/m ²	A	0.15
理想气体常数/ (J · (mol · K) ⁻¹)	R	8.314
水的分子量/(kg · mol ⁻¹)	M	0.018
水冰密度/(kg · m ⁻³)	ρ_a	950
月壤孔隙度	ϕ	0.35
月壤水冰平均含量 (vol%)	λ	5.0
月壤初始温度/K	T_0	60
月壤密度/(kg · m ⁻³)	ρ	1 660
月壤比热容/(J · (kg · K) ⁻¹)	c	800
月壤热导率/(W · (m · K) ⁻¹)	$\kappa(\lambda_i)$	$\kappa(\lambda_i) = 2.84\lambda_i + 0.604$
月壤热扩散率/(m ² · s ⁻¹)	$\beta(\lambda_i)$	$\beta(\lambda_i) = \kappa(\lambda_i) / \rho c$
水冰升华系数	α	$\alpha(T) = \frac{0.854}{1 + e^{-11580(T^{-1} - 0.00499)}} + 0.146$
水蒸气饱和压强/pa	P_s	$P_s = 10^{\frac{-2663.5}{T} + 12.537}$
水冰升华焓 (200 K) / (J · kg ⁻¹)	L	861

根据质量守恒原理, 在水蒸气的收集过程中, 绝热罩内的水蒸气质量, 等于水冰升华产生的水蒸气质量减去进入导气管而被捕获的水蒸气质量, 再减去此过程中损失的水蒸气质量, 损失主要来源于升华过程中部分水蒸气残留在月壤风化层的孔隙当中。

$$m_{\text{rem}} = m_{\text{pro}} - m_{\text{col}} - m_{\text{loss}} \quad (1)$$

短时间内因热扩散而损失的水蒸气质量相对较少, 可忽略不计, 而后将上述方程对时间求导, 得到关于质量变化速率的等式

$$\frac{dm_{\text{rem}}}{dt} = v_{\text{pro}} - v_{\text{col}} \quad (2)$$

绝热捕集罩内的水蒸气达到平衡状态以后, 其质量不再变化, 即上式左侧为0, 故推出水蒸气产生速率等于收集速率, 根据Hertz-Knudsen-Schrage方程得出水蒸气产生速率为

$$v_{\text{pro}} = \frac{2\lambda S \alpha}{2 - \alpha} \left(\frac{M}{2\pi RT_p} \right)^{0.5} (P_s - P) \quad (3)$$

其中: 捕集罩内气压 P 为未知量, 再根据气体扩散定律给出水蒸气收集速率的表达式为

$$v_{\text{col}} = P \cdot A \cdot \left(\frac{M}{2\pi RT_p} \right)^{0.5} \quad (4)$$

令(3)、(4)两式相等, 求解捕集罩内压强 P , 而后回代到(4)式, 得到水蒸气收集速率的表达式

$$v_{\text{col}} = \frac{2\lambda S \alpha P_s}{A(2 - \alpha) + 2\lambda S \alpha} \cdot \left(\frac{M}{2\pi RT_p} \right)^{0.5} \quad (5)$$

其中: T_p 代表采集区域月壤的平均温度。

1.3 热传导数值解算的有限差分方法

热管放出的热量以热传导的形式对采水区域进行加热, 采水区域的深度范围从月表以下0.7~1.0 m, 三维采水区域 R 的6个边界面 B 处温度梯度为0, 因此对三维传热效果的研究可以列写为空间热传导初边值混合问题如下

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + W_{\text{sub}} = \beta(\lambda_i) \nabla^2 T + f(x, y, z, t) \\ \nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, (x, y, z) \in R \\ T(x, y, z, 0) = T_0, (x, y, z) \notin \Gamma \\ T(x, y, z, t) = T_w, (x, y, z) \in \Gamma \\ \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{(x, y, z) \in B} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

热管以工作温度 T_w 在位置 Γ 处加热初始温度为 T_0 的月壤, 热源项(即非齐次项) $f(x, y, t)$ 为零, 因水冰升华吸热而损失的能量 W_{sub} , 可以表示为

$$W_{\text{sub}} = \phi L F_{\text{sub}} \quad (7)$$

其中: F_{sub} 表示水冰升华产生的水蒸气流量, 关于这一项, 文献[7]给出了清晰的表述和计算, 本文不再讨论。

月壤温度变化的数学模型的求解, 取决于对上述三维热传导微分方程所采取的解法。考虑到此偏微分方程解析解的形式随初边值条件的变化会产生较大差异, 不具有普遍性, 所以采用数值解法^[13]。

本文使用三维有限差分法解决月壤传热学的初边值混合问题。基于1.1节建立的点云模型, 在时间层 n 到时间层 $n+1$ 这一时间步长 τ 内, 对于每个点, 相邻的点都会与之发生热交换作用, 将这些热交换的效果线性叠加, 即可得出在这一时间步长内该点的温度变化, 进而求得该点在时间层 $n+1$ 下的温度。有限差分法迭代格式的建立, 可按照泛定方程中的微分公式, 把微商换成差商, 从而把原问题离散化为差分格式, 进

而迭代求出数值解^[14]。

本文建立三维有限差分方法的迭代格式如下

$$\begin{cases} \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\tau} + W_{\text{sub}} = \beta(\lambda_i) \nabla^2 T \\ \nabla^2 T = \frac{\delta_x^2 T_{i,j,k}^n}{h_x^2} + \frac{\delta_y^2 T_{i,j,k}^n}{h_y^2} + \frac{\delta_z^2 T_{i,j,k}^n}{h_z^2} \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \delta_x^2 T_{i,j,k}^n = T_{i+1,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i-1,j,k}^n \\ \delta_y^2 T_{i,j,k}^n = T_{i,j+1,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j-1,k}^n \\ \delta_z^2 T_{i,j,k}^n = T_{i,j,k+1}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j,k-1}^n \end{cases} \quad (9)$$

对上述热传导问题进行有限差分数值模拟, 能够得到任意热管布局下加热全过程月壤温度变化的动态等高线图, 如图 3 所示, 发现从零时刻开始加热, 月壤通过热传导而升温, 温度超过水冰升华点 (200 K) 的区域 (简称橙色区域) 不断扩大。记橙色区域占采水总区域的体积百分比为 m , m 的值也代表开采过程能够有效利用的区域大小, 经过约 6.531×10^5 次迭代, m 的上升趋势明显减弱, 其数值趋于恒定, 说明采水区域的平均温度接近稳定。这一迭代次数所对应的时长为 332.49 h, 记为 t_a (月壤的热扩散时间), 该时间内, m 值不断上升直至平稳。在 t_a 以后, 捕集罩内平均温度几乎不再波动, 这时开放水蒸气导管的进气口, 进行水蒸气的收集, 收集过程所用时间记为 t_b 。

更好的全局寻优能力。遗传算法的这些特质, 决定了其广泛的应用领域, 也使其成为现代智能计算中的关键方法^[15-16]。

本文使用遗传算法对热管阵列布局进行优化, 目标是在增加采水量的同时尽可能地减少能量消耗, 算法的适应度函数 F 设置为采集水冰的质量和热管阵列输入热流总量的比值, 本文旨在搜索出 F 取极大值时所对应的热管阵列布局。记单枚热管输入热流为 P_r , 其值与光热收集器的效果有关, 热管阵列含 n 支热管, 每一支热管都具有相同的 P_r , 这里不需给出输入热流 P_r 的具体表达式。综合上述月壤传热模型和水蒸气收集模型中的参数, 给出适应度函数 F 的基本表达式为

$$F = \frac{\int \rho_a \lambda_i dV}{P_r(t_a + t_b)n} \quad (10)$$

t_b 对应水蒸气收集时间, 等于采水量与水蒸气收集速率的比值, 即

$$t_b = \frac{\int \rho_a \lambda_i dV}{v_{\text{col}}} = \int \rho_a \lambda_i dV \frac{2\lambda S \alpha + A(2 - \alpha) \left(\frac{2\pi RT_p}{M} \right)^{\frac{1}{2}}}{2P_s A \alpha \lambda S} \quad (11)$$

代入 t_b , 得出遗传算法适应度 F 的完整表达式为

$$F = \frac{\int \rho_a \lambda_i dV}{P_r(t_a + \int \rho_a \lambda_i dV \frac{2\lambda S \alpha + A(2 - \alpha) \left(\frac{2\pi RT_p}{M} \right)^{\frac{1}{2}}}{2P_s A \alpha \lambda S})n} \quad (12)$$

在热管阵列的优化研究中, 遗传算法的约束条件除热传导的初边值限制以外, 还需考虑到实际情况: 采水机构携带的热管数目不能过多, 容易使阵列展开和钻入过程的可靠性不足, 当然热管数目也不能过少, 否则开采区域利用率太低, 水冰提取也就失去了意义。综合以上条件, 阵列中的热管数量 n 在 [3, 9] 之间选取。

染色体的定义和编码方式是遗传算法的重要切入点^[17], 根据第一节对热管布局的设计, 每个热管所在位置都用一个编号表示, 这个编号对应遗传算法里的一条染色体。热管的编号为十进制的 1~256, 而遗传算法中染色体上每个基因的编码为二进制的 0 或 1, 所以需要进制转换, 256 个十进制数需要 8 位二进制数来表示。从 00000000 到 11111111, 能够表示的十进制范围是 0~255, 因此在二进制到十进制的转换后需要加 1, 才能符合热管在采集区域网格内的编号。从进化的观点来看, 多种热管布局方式共同构成一个种群, 其中的任意一种热管布局 (含 n 个热管) 都作为种群中的一个个体出现, 这一个体含 n 条染色体, 每条染

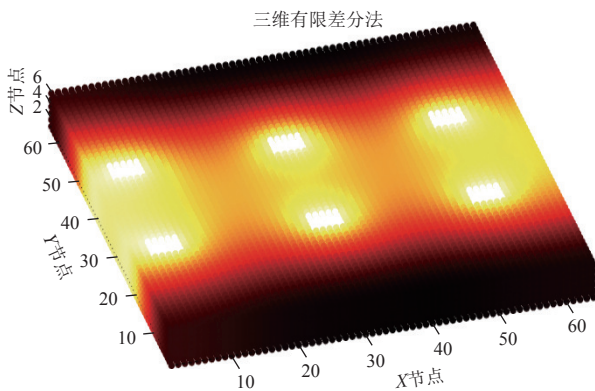


图 3 三维有限差分法模拟月壤导热过程

Fig. 3 Simulation of lunar soil's heat conduction by three-dimensional finite difference method

2 遗传算法优化热管布局

遗传算法作为一种重要的进化类算法, 借鉴自然界的进化规律, 依照优胜劣汰、适者生存的遗传机制进行随机化搜索。遗传算法于 1975 年被提出, 其主要特点是采用概率化的寻优方法, 直接对种群进行操作。相比于传统的迭代算法, 具有更高的自适应性和

色体的长度为8,或者说每条染色体上含有8个基因。
表2列出了与图2中热管编号相应的染色体编码。

表2 染色体编码方式

Table 2 Encoding mode of chromosome

基因染色体	A	B	C	D	E	F	G	H	染色体对应十进制数
1	0	0	1	0	0	1	0	1	38
2	0	0	1	0	1	0	1	0	43
3	0	1	1	1	0	0	1	0	115
4	0	1	1	1	1	0	0	0	121
5	0	1	1	1	1	1	1	0	127
6	1	1	0	1	0	1	0	1	214
7	1	1	0	1	1	0	1	0	219

分析适应度 F 的表达式,若固定 n 的取值,则表达式中的变量为采水量和区域温度 T_p (水蒸气饱和压 P_s 和水冰升华系数 α 均为 T_p 的函数)。为使优化过程清晰有序进行,且避免算法陷入局部最优,本文确立遗传算法的总体思路:先纵向进行,对于 n 在[3, 9]之间的每一个取值,随机生成初始种群,使用选择、交叉、变异算子对种群进行进化操作,迭代一定次数,找出最大适应度值所对应的阵列,得到7组局部最优解;而后对上述各局部最优做横向比较,最终找出适应度函数 F 全局极大值对应的 n 和热管布局方式,作为热管阵列的全局最优解。

优化思路确定后,随机生成初始种群,并对关键的进化算子进行定义。对于选择算子,首先要计算种群中每个个体的适应度,然后依照轮盘赌方法筛选优秀个体,淘汰适应度低的个体,使种群向着适应度 F 上升的方向进化^[18]。与传统的自然选择不同的是,本文运用精英主义原则,对于每一代适应度最高的个体,给予直接保留,进入到下一代,这是为了避免精英个体在轮盘赌这一随机过程中被筛去,也防止精英个体在交叉、变异过程中发生基因改变,如图4所示。精英主义原则的最大优势是完整保留优秀基因,随进化代数增加,最佳适应度保持不变或逐渐上升,不会出现下降的趋势,确保了优秀基因在种群当中的延续^[19]。在实际应用中,精英主义原则增加了遗传算法对最优

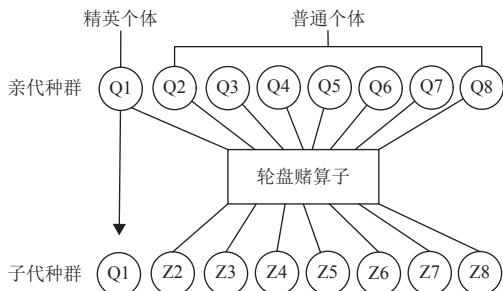


图4 选择算子的精英主义原则

Fig. 4 Elitism principle of selection operator

解的搜索效率,减少了迭代次数。

对于交叉算子,采用后向多点基因互换^[20],与传统的交叉相区别的是,本文引入君主交叉方案:本代精英个体作为君主,通过君主染色体与普通个体的染色体交叉,广泛地将精英个体的优秀基因引入整个种群,而君主染色体本身不发生变化,普通染色体 x 与君主染色体 x_{emp} 交叉过程的表达式为

$$crosspoint = round(rand \times length) \quad (13)$$

$$\begin{cases} x_{new} = x(1, crosspoint) + x_{emp}(crosspoint + 1, length) \\ x_{emp} = x_{emp} \end{cases} \quad (14)$$

$length$ 代表染色体 x 的长度,交叉点 $crosspoint$ 通过随机数选择,用 $round$ 函数取整,种群的一半使用君主方案,另一半使用传统交叉。

交叉算子利用种群中现有的基因进行互换,这可能使种群陷入局部最优解,为防止局部收敛的发生,通过变异算子来增加新的基因,增强算法的搜索范围,以搜寻全局最优^[21]。本文采用单点基因变异,种群中任何一个个体中的任何一条染色体均有一次变异机会。

3 仿真结果与分析

编写遗传算法,按图5的流程进行种群的进化,种群大小设置为100,设置交叉概率0.6,变异概率0.08,对于每一个 n 的取值,进化代数为300。图6展示了 $n = 3, 4, 5, 6$ 时种群每一代最优个体的进化过程。

$n = 3$ 至 $n = 6$ 时的最优热管布局(三维点云的二维俯视图)如图7所示,左侧一列表示初始状态,右侧一列表示经过 t_a 时间,橙色区域不再扩大之后采水区域的温度分布。

表3给出了最优解的详细信息:热管位置编号、 m 值(有水冰升华的区域占总区域的体积百分比)、收集水冰的总质量、适应度函数 F 值。

从表3中可以看出,热管数量 n 在3~6之间, m 值并不高,说明热管布局方式对采水区域的利用效率不高,而且适应度函数 F 的取值也偏低,经分析知 $n = 3 \sim 6$ 的4组局部最优解不能满足月球极区水冰开采任务对采水效益的需求,不可作为全局最优解。

图8的三条曲线展示了 $n = 7 \sim 9$ 时种群最优个体的进化历程,相比于图6,可以发现曲线随迭代次数的增加,其上升趋势更加明显,说明遗传算法起到了较好的优化效果。

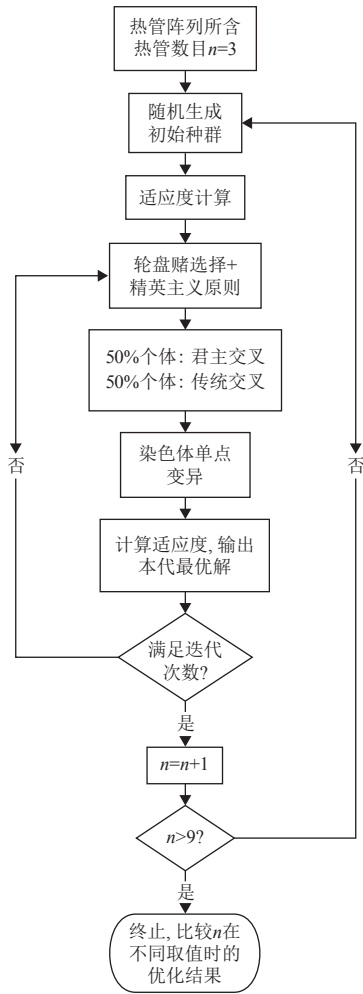


图 5 遗传算法优化流程

Fig. 5 Optimization process of genetic algorithm

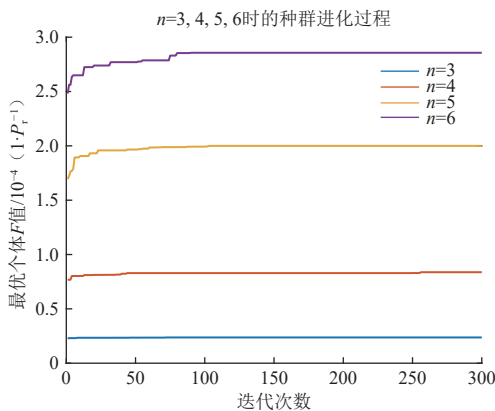


图 6 $n=3, 4, 5, 6$ 时种群的进化过程

Fig. 6 Evolution of population at $n=3, 4, 5, 6$

图9展示了 $n=7\sim 9$ 时的最优热管布局, 可以看出, 二维俯视图中橙色区域的面积相较于图7, 有明显的扩大。表4给出了这三组最优解的详细信息。

表4的优化结果中, 适应度 F 值比表3有明显提升, 特别是热管数量 $n=8$ 时的最优个体取得了 F 的全局极

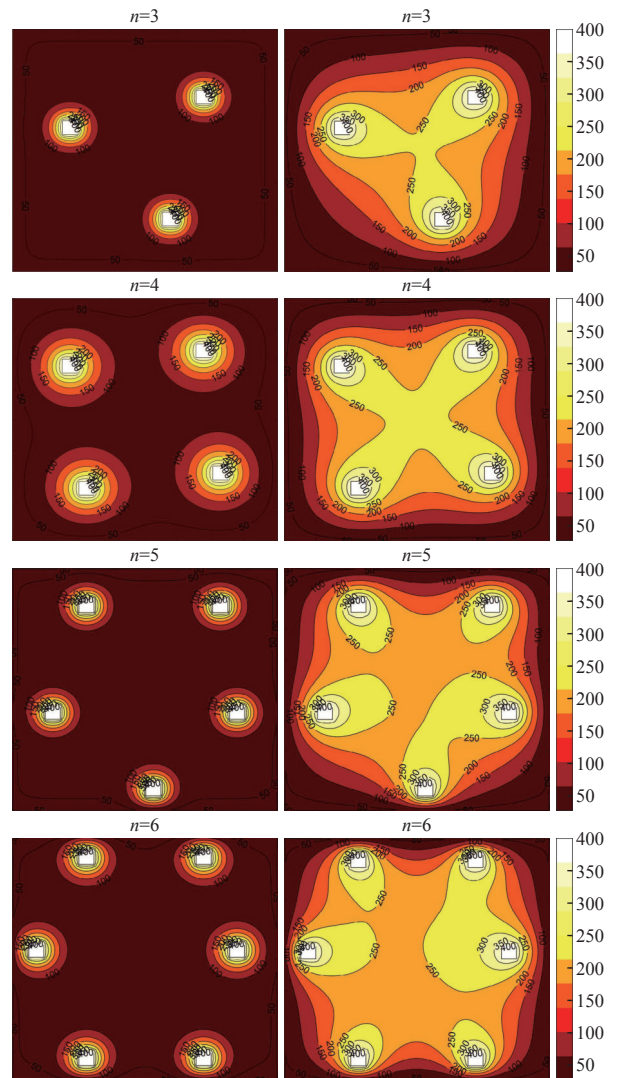


图 7 $n=3\sim 6$ 时的最优热管布局

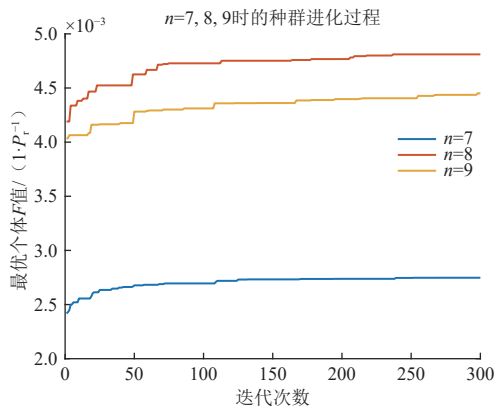
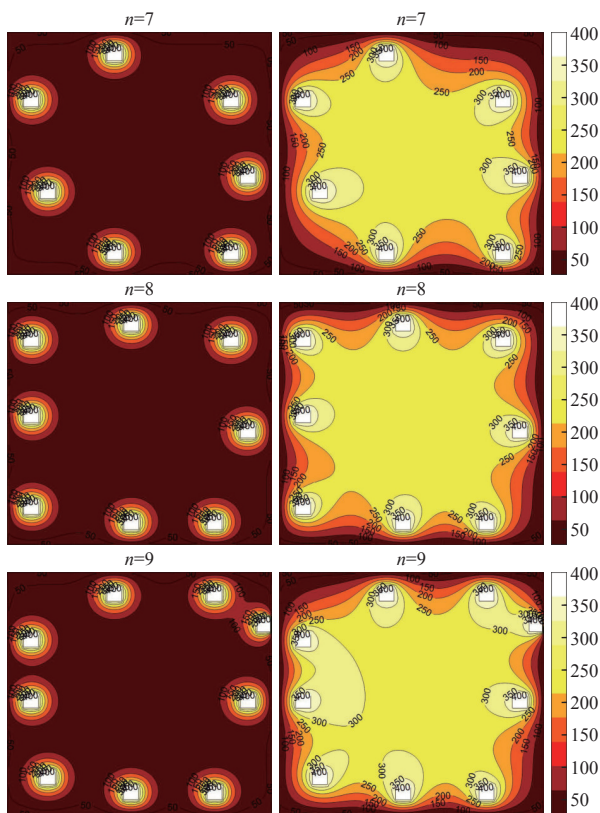
Fig. 7 Heat pipe's optimal layout from $n=3$ to $n=6$

表 3 遗传算法对热管阵列布局的优化结果 ($n=3\sim 6$)

Table 3 Optimization results of genetic algorithm for heat pipe array's layout ($n=3\sim 6$)

n	分布位置	m	采水总量/kg	F 值/ P_r^{-1}
3	[58, 148, 188]	0.369 2	53.244 9	$2.369 5 \times 10^{-5}$
4	[53, 77, 180, 204]	0.443 6	64.756 1	$8.837 3 \times 10^{-5}$
5	[25, 99, 110, 213, 221]	0.538 1	78.419 5	$1.995 2 \times 10^{-4}$
6	[21, 28, 130, 142, 229, 236]	0.627 5	91.563 0	$2.857 6 \times 10^{-4}$

大值0.004 81, 因此得出月球极区水冰开采热管阵列布局的最优解: 按网格的编号规则, 8枚热管的分布位置为[24, 29, 34, 127, 130, 210, 222, 232], 73.62%的采水区域得到了有效利用, 一台采水机构携带左右两组热管阵列, 一次任务能够获得的水冰总质量为215.66 kg, 经后续计算, 完成加热、收集的全过程所需总时间为524.18 h。

图8 $n=7, 8, 9$ 时的种群进化过程Fig. 8 Evolution of population at $n=7, 8, 9$ 图9 $n=7\sim 9$ 时的最优热管布局Fig. 9 Heat pipe's optimal layout from $n=7$ to $n=9$ 表4 遗传算法对热管阵列布局的优化结果 ($n=7\sim 9$)Table 4 Optimization results of genetic algorithm for heat pipe array's layout ($n=7\sim 9$)

n	分布位置	m	采水总量/kg	F 值/ P_r^{-1}
7	[23, 30, 83, 111, 178, 190, 231]	0.6613	96.5032	0.00274
8	[24, 29, 34, 127, 130, 210, 222, 232]	0.7362	107.8254	0.00481
9	[24, 29, 35, 114, 127, 178, 208, 231, 237]	0.7548	110.2106	0.00445

4 结论

本文针对月球极区水冰原位资源的开采进行了热

管布局设计, 对热传导过程用三维有限差分方法作出解算, 相比于其他数值解法, 迭代格式简便, 且消耗计算量更小。而后通过遗传算法优化热管阵列, 对遗传算子的传统定义进行改进, 增加了优秀基因在种群中的比例, 提高了算法的搜索速度和收敛精度; 并且将热管数量独立于算法本身, 依据“先局部, 后全局”的搜索方式, 给出了最优解对应的完整数据结果与图示, 很好地避免了局部收敛, 确保了全局最优解的捕获。优化后的热管阵列能够在最少热流消耗下获得最大的采水量, 有一定的工程实际意义。在具体操作方面, 可以根据采水区域月壤的采样数据, 分析月壤水冰含量和水冰所处深度, 进而设计热管放热段的长度; 另外, 本文提出的方案中热管的定位精度为0.2 m, 这也对热管阵列折展机构的精度提出了约束, 控制热管展开的机械装置需满足精度要求, 并在月球极区的深冷条件下具有一定的可靠性。本文的优化设计方法可以用于后续实验模拟, 为今后中国月球探测器着陆极区, 进行水冰原位资源开采打下基础, 为月球基地生命保障系统的建设提供支持。

参 考 文 献

- [1] SCHMITT H H, ARMSTRONG N. Return to the Moon: exploration, enterprise, and energy in the human settlement of space[M]. New York: Copernicus Books, 2006.
- [2] LI C, WANG C, WEI Y, et al. China's present and future lunar exploration program[J]. *Science*, 2019, 365(6450): 238-239.
- [3] FELDMAN W C, MAURICE S, LAWRENCE D J, et al. Evidence for water ice near the lunar poles[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E10): 23231-23251.
- [4] 何成旦, 李亚胜, 温智, 等. 月表水冰探测与赋存形态研究进展[J]. *真空与低温*, 2021, 27(6): 589-600.
HE C D, LI Y S, WEN Z, et al. Research progress of lunar surface water ice detection and occurrence form[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2021, 27(6): 589-600.
- [5] 王超, 张晓静, 姚伟. 月球极区水冰资源原位开发利用研究进展[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(3): 241-247.
WANG C, ZHANG X J, YAO W. Research prospects of lunar polar water ice resource in-situ utilization[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 241-247.
- [6] BRISSET J, MILETICH T, METZGER P. Thermal extraction of water ice from the lunar surface-A 3D numerical model[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 193: 105802.
- [7] SONG H, ZHANG J, NI D, et al. Investigation on in-situ water ice recovery considering energy efficiency at the lunar south pole[J]. *Applied Energy*, 2021, 298: 117136.
- [8] ZACNY K, VENDIOLA V, MORRISON P, et al. Earth and Space 2021[M]/USA: American Society of Civil Engineers, 2021: 713-723.
- [9] JUST G H. Investigation and development of regolith excavation and handling mechanisms for lunar in-situ resource utilisation[D]. United

- Kingdom: The University of Manchester (United Kingdom), 2021.
- [10] 张光涵. 月壤水冰挥发扩散特性及热扰动模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- ZhANG G H. Research on volatilization-diffusion characteristics and thermal disturbance model of lunar soil water ice[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [11] SANIN A B, MITROFANOV I G, LITVAK M L, et al. Testing lunar permanently shadowed regions for water ice: LEND results from LRO[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117(E12): 1-8.
- [12] 任小朋, 樊红辉. 冻土导热系数的非线性规律研究[J]. 成都大学学报: 自然科学版, 2015, 34(1): 101-104.
- REN X P, FAN H H. Nonlinear law research of heat conductivity for frozen soil[J]. *Journal of Chengdu University: Natural Science Edition*, 2015, 34(1): 101-104.
- [13] 杨建宏. 抛物型方程有限差分法显—隐格式比较分析[J]. *河南科学*, 2012, 30(4): 407-410.
- YANG J H. Comparison on explicit-implicit schemes of finite difference method for the parabolic equations[J]. *Henan Science*, 2012, 30(4): 407-410.
- [14] WANG Y, WANG S, LIU S, et al. Three-dimensional simulation of a PEM fuel cell with experimentally measured through-plane gas effective diffusivity considering Knudsen diffusion and the liquid water effect in porous electrodes[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 318: 770-782.
- [15] AMJAD M K, BUTT S I, KOUSAR R, et al. Recent research trends in genetic algorithm based flexible job shop scheduling problems[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018(8): 1-32.
- [16] MIRJALILI S, SONG DONG J, SADIQ A S, et al. Genetic algorithm: theory, literature review, and application in image reconstruction[J]. *Nature-inspired Optimizers*, 2020(2): 69-85.
- [17] ZANG W, REN L, ZHANG W, et al. A cloud model based DNA genetic algorithm for numerical optimization problems[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018, 81: 465-477.
- [18] 马洁莹. 基于轮盘赌策略的混沌萤火虫算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- MA J Y. Research on chaotic firefly algorithm based on roulette wheel selection strategy[D]. Xidian: Xidian University, 2018.
- [19] HEMANTH D J, ANITHA J. Modified genetic algorithm approaches for classification of abnormal magnetic resonance brain tumour images[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 75: 21-28.
- [20] HASSANAT A, ALMOHAMMADI K, ALKAFaweEN E, et al. Choosing mutation and crossover ratios for genetic algorithms—a review with a new dynamic approach[J]. *Information*, 2019, 10(12): 390.
- [21] 胡涛, 申立群, 付晋, 等. 基于多种群遗传算法的航天复杂系统测试任务调度[J/OL]. [2022-05-09]. 计算机集成制造系统. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20220314.1122.010.html>.
- HU T, SHEN L Q, FU J, et al. Scheduling of aerospace complex system test tasks based on multi-population genetic algorithm[J/OL]. [2022-05-09]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20220314.1122.010.html>.
- 作者简介:
赵嘉龙(2000-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 月球基地、行星原位资源开采。
通信地址: 哈尔滨工业大学科学园2B栋(150001)
电话: (0451)86402628
E-mail: 13654667932@163.com
袁帅(1988-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 自适应控制和学习系统。**本文通信作者**。
通信地址: 哈尔滨工业大学科学园2B栋(150001)
电话: (0451)86402628
E-mail: shuaiyuan@hit.edu.cn
张泽旭(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 深空探测器自主导航与控制、图像(视觉)导航、编队控制。
通信地址: 哈尔滨工业大学科学园2B栋(150001)
电话: (0451)86402628
E-mail: zexuzhang@hit.edu.cn

Design Method of Heat Pipe Array's Layout for Lunar Polar Water Ice Mining

ZHAO Jialong, YUAN Shuai, ZHANG Zexu

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To exploit water ice in-situ resources in lunar polar region, a design method of heat pipe array's layout was proposed in this paper. Firstly, the heat pipe array was presented according to the water ice mining scheme, and heat conduction process of heat pipe array was numerically solved by three-dimensional finite difference method. Secondly, the objective function of water production and heat flow consumption was established. Genetic algorithm was used to optimize the layout of heat pipe array, and the optimal solution of heat pipe's layout was acquired by iterative search. Simulation results show that the optimal layout of heat pipe array could obtain maximum water production with minimum heat flow consumption. Besides, mass of water ice collected in a task and total time required were given. The application of this design method to life support system of lunar base can improve the efficiency of polar in-situ resources' collection.

Keywords: water ice mining; heat pipe array; genetic algorithm; optimization problem

Highlights:

- Three-dimensional finite difference method is used to calculate heat conduction model of lunar soil. Compared with other numerical methods, the iterative scheme is simple and calculation accuracy is fine.
- Operator definition of the classical genetic algorithm is modified in order to increase the proportion of excellent genes in the population and improve searching speed and convergence accuracy of the algorithm.
- Genetic algorithm is based on the search mode of "global after local" to avoid falling into local convergence and ensure the capture of the global optimal solution.
- Considering both water production and heat flow consumption, the optimized heat pipe array's layout has the highest efficiency in practical mining tasks.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]