

# MW 级空间核反应堆系统 热管式辐射散热器分析及优化

张昊春<sup>1</sup>, 刘秀婷<sup>1</sup>, 魏前明<sup>1</sup>, 游尔胜<sup>2</sup>, 孙铭远<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国核动力研究设计院 中核核反应堆热工水力技术重点实验室, 四川 成都 610213)

**摘要:** 空间核反应堆是空间核电源和核推进的研究基础, 大功率核反应堆的体积和质量一直是限制航空航天设计的重要因素。针对这一问题, 本文对 MW 级空间核反应堆系统热管式辐射散热器进行建模和分析, 建立热管式辐射散热器的热阻模型, 利用穷举法和遗传算法在给定工况下探讨裸碳纤维翅片长度  $L_f$  和厚度  $\delta_f$ 、冷却剂质量流量  $m$ 、辐射散热器入口温度  $T_{fi}$  对散热器质量  $M$  的影响。结果表明, 当  $T_{fi} = 800$  K、 $L_f = 5$  cm、 $\delta_f = 0.16$  mm、 $m = 9$  kg/s 时,  $M$  达到最优, 为 906.593 kg, 优化了 0.63% 的系统质量。

**关键词:** 空间核反应堆; 热管式辐射散热器; 遗传算法; 质量优化

中图分类号: TL334

文献标志码: A

doi: 10.7538/yzk.2020.youxian.0018

## Analysis and Optimization of Heat Pipe Radiation Radiator for MW Space Nuclear Reactor System

ZHANG Haochun<sup>1</sup>, LIU Xiuting<sup>1</sup>, WEI Qianming<sup>1</sup>, YOU Ersheng<sup>2</sup>, SUN Mingyuan<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150001, China; 2. CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology,  
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

**Abstract:** Space nuclear reactor is the research foundation of space nuclear power and nuclear propulsion. The volume and mass of high-power nuclear reactor are always the important factors limiting the aerospace design. In view of this problem, the heat pipe radiation radiator of MW space nuclear reactor system was modeled and analyzed, and the thermal resistance model of the heat pipe radiation radiator was established in this study. The effect of the length  $L_f$  and thickness  $\delta_f$  of the bare carbon fiber fin, the mass flow  $m$  of the coolant, the inlet temperature  $T_{fi}$  of the radiation radiator on the mass  $M$  of the radiation radiator was discussed under the given conditions by the exhaustive method and genetic algorithm. The results show that when  $T_{fi}$  is 800 K,  $L_f$  is 5 cm,  $\delta_f$

收稿日期: 2020-01-07; 修回日期: 2020-04-04

基金项目: 核反应堆系统设计技术重点实验室资助项目 (HT-KFKT-10-2018004); 国防科技工业核动力技术创新中心基金资助项目 (HDLXZX-2019-ZH-013)

作者简介: 张昊春 (1977—), 男, 甘肃永靖人, 教授, 从事飞行器热控、目标特性、先进能源技术研究

is 0.16 mm, and  $m$  is 9 kg/s,  $M$  is the best. At this time,  $M$  is 906.593 kg, and 0.63% of the system mass is optimized.

**Key words:** space nuclear reactor; heat pipe radiation radiator; genetic algorithm; mass optimization

空间核动力系统因其输出功率高、能量密度大、工作时间长<sup>[1]</sup>成为深空探测最具发展前景的选择之一。由于大功率空间核反应堆系统需要大量散热,故其辐射散热部分体积通常占据整体的 60% 左右,因此,对大功率空间核反应堆系统的辐射散热器进行设计和分析优化具有实际意义和参考价值。

已有的热管式空间冷却堆热电转换系统皆为概念设计方案,主要是堆芯热管所选用的工质和热电转化方式不同。如采用锂热管冷却堆芯、分段式静态热电偶转换器进行热电转换的 HP-STMCs<sup>[2]</sup> 和采用钠热管冷却堆芯、碱金属热电转换装置 (AMTEC) 进行热电转换的 SAIRS<sup>[3]</sup> (scalable AMTEC intergraded reactor space power system) 热管式空间冷却堆,以上两种系统均采用钾热管通过散热器将废热排向太空。此外,还有用于火星表面活动的电源、热量通过钠热管被带出堆芯传递到能量转化系统的 HOMER<sup>[4]</sup> (heatpipe-operated mars exploration reactor), 通过自由活塞式斯特林发电机实现热电转换的 kW 级空间核反应堆电源 Kilo-power 等<sup>[5]</sup>。近年来热管式辐射散热器的性能研究是国内外研究热点,谢荣建<sup>[6]</sup>运用遗传算法对地球静止轨道热控系统中热管辐射散热器进行性能研究,得出了热控制要求下最轻的散热器质量。刘道等<sup>[7]</sup>对空间堆热管式辐射散热器进行初步设计分析,得到了相应功率下,必要热管根数及最佳冷却流体流量。Jebraill 等<sup>[8]</sup>对热管式热电偶散热器进行了研究。Bieger<sup>[9]</sup>对微重力环境下的热管长度、厚度参数进行优化设计,在满足热管散热功率的条件下,得出其设计热管的最佳参数。Sam 等<sup>[10]</sup>提出一种应用于实际工程设计的热管式散热器的优化,考虑到功率最大的状态、太阳能通量、散热和元件的设计温度上限,确定最佳散热器的尺寸。Wenwen 等<sup>[11]</sup>为俄罗斯 TOPAZ-II 空间核电源系统提出了一种碱金属热管式散热器,采用以钾为工质的高温热管,丝网作为芯层,采用不锈钢制成,通过辐射散热,选

择整体碳翅片覆盖和连接热管作为整个辐射散热器。本文基于热管式散热器的工作原理,通过遗传算法,获得多因素下散热器质量的最优解,以降低空间核反应堆的运行负荷。

## 1 工作原理

热管式空间辐射散热器由多个热管式辐射散热器单元组成,其工作流程为:流动的冷却剂工质从热源吸收经热电转换后的废热,在冷却剂工质流经辐射散热器时,热量被传递至辐射散热器,辐射散热器上安装热管,热量经热管传递给辐射翅片,辐射翅片底部加装隔热层,屏蔽热量向航天器的辐射,热量最后通过辐射排向外太空。图 1 为空间热管式辐射散热系统示意图。热管管壳材料选取高强度质量比、高导热率的镍合金,工作介质选择熔点为 98 °C、沸点为 892 °C 的液态金属钠<sup>[12]</sup>,其工作温度为 600~1 200 °C,热管吸液芯材料选择钼铌合金 (Mo-14% Re)<sup>[13]</sup>,热管与裸碳纤维翅片焊接选用导热系数为 219 W/(m·K) 的活性钎焊合金 Ticusil<sup>[14]</sup>,热管冷凝段钎焊连接裸碳纤维翅片<sup>[15]</sup>。冷却剂回路工作介质选择液态金属钾,其物性参数参见文献[16-17]。热管的工作原理如图 2 所示。典型的热管由热管外壳、紧贴内壁的吸液芯毛细多孔材料、端盖构成。热管被加热的一端称为蒸发段,热量经热管壁传递给吸液芯(多孔材料),再传递给吸液芯中的液

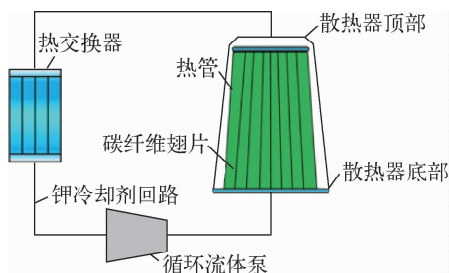


图 1 空间热管式辐射散热系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of space heat pipe radiation cooling system

态工作介质使之蒸发气化,该热量即为液态工作介质的蒸发潜热,由于热管蒸发段蒸气温度高所引起的压力差驱动蒸气从中心气腔流向热管另一端,高温蒸气在另一端遇冷凝结,同时释放出潜热,这一端被称为冷凝段。热管冷凝段冷凝的饱和液体由于受到管芯多孔材料的毛细力重新流回蒸发段。如此循环往复,热量便由热管一端传递至另一端。

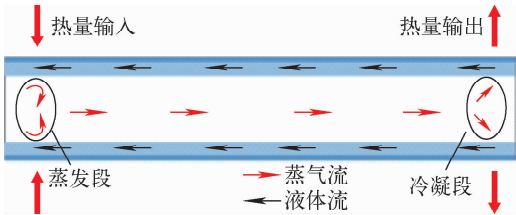


图 2 热管工作原理示意图

Fig. 2 Working principle diagram of heat pipe

2 参数选择和模型建立

2.1 主要设计参数

参考辐射散热器的经典参数,对于 MW 级空间核电源,堆芯功率为 3.2 MW,转换效率为 31.8%,废热排出要求为 2.18 MW<sup>[15]</sup>。辐射散热器进口温度为 800 K,冷却剂回路质量流量为 8 kg/s,冷却剂回路管道直径为 50 mm。辐射散热器中热管的尺寸参数列于表 1。

表 1 辐射散热器热管设计参数  
Table 1 Design parameter  
of radiation radiator heat pipe

参数	数值
热管管壳厚度,mm	0.50
热管蒸发段外径,mm	80.00
热管冷凝段外径,mm	18.00
中心气腔半径,mm	7.50
干线芯厚度,mm	0.30
液腔厚度,mm	0.70
吸液芯有效孔径, $\mu\text{m}$	18.00
吸液芯孔隙率	0.69
热管蒸发段长度,m	0.40
热管冷凝段长度,m	2.00
Ticusil 钎焊层厚度,mm	1.00

冷却剂回路工作介质可选择液态金属钾(临界温度 2 222 K,临界压力 16.2 MPa),钾物性参数可由式(1)~(4)计算。

$$\lambda = 92.95 - 0.058\,1T + 11.727\,4 \times 10^{-6}T^2 \tag{1}$$

$$c_p = 1\,436.72 - 0.580T + 4.627 \times 10^{-4}T^2 \tag{2}$$

$$\ln \mu = -6.484\,6 - 0.429\,03 \ln T + 485.3/T \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \rho \times 10^{-3} = & 0.902\,813\,76 - 0.169\,907\,11 \times \\ & (T \times 10^{-3}) - 0.268\,647\,69(T \times 10^{-3})^2 - \\ & 0.505\,681\,88(T \times 10^{-3})^3 - 0.465\,379\,12 \times \\ & (T \times 10^{-3})^4 + 0.203\,781\,07(T \times 10^{-3})^5 - \\ & 0.034\,771\,31(T \times 10^{-3})^6 \end{aligned} \tag{4}$$

式中: $\rho$ 为液体密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\lambda$ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $c_p$ 为比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$ 为温度,K;  $\mu$ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

2.2 换热计算

1) 热管式辐射散热器与宇宙空间辐射散热  
当 MW 级空间辐射散热器正常工作时,热量来源为冷却剂温降,热量去向为空间环境的辐射散热,选取第  $i$  个热管式辐射散热器单元作为研究对象,热管式辐射散热器单元由单根热管、加装在热管两侧的裸碳纤维翅片组成。由于 MW 级航天飞行器处于深空宇宙,无对流换热,考虑到热管的等温性,将三维翅片沿热管方向简化成单位长度的二维翅片模型,如图 3 所示。

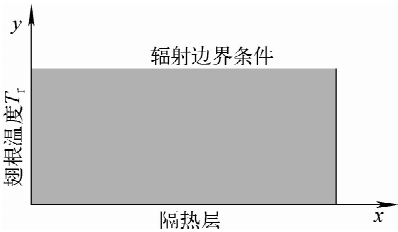


图 3 二维翅片辐射散热模型

Fig. 3 Two-dimensional fin radiation cooling model

记翅长(相邻热管间距)为  $L_f$ 、翅厚  $\delta_f$ 、翅根温度为  $T_r$ 。以翅根与翅片下端绝热层的交点为坐标原点建立直角坐标系。 $x$  在  $0 \sim L_f$  之间取值, $y$  在  $0 \sim \delta_f$  之间取值, $n$  为节点个数。

二维模型内部节点控制方程<sup>[18]</sup>如下:

$$\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 = 0 \tag{5}$$

上边界:

$$\begin{aligned} \lambda T(i, ny) = & \lambda T(i, ny - 1) - \\ & \varepsilon \sigma (T^4(i, ny) - T_\infty^4) dy \end{aligned} \tag{6}$$

式中:  $\epsilon$  为发射率;  $\sigma$  为辐射常数,  $W/(m^2 \cdot K^2)$ 。

运用有限差分 and 迭代法, 可计算二维翅片模型稳态热分布, 通过迭代计算可得出单位翅长辐射面各点的温度。求得辐射面各点温度后, 可由式(7)计算热管式辐射散热器单元的辐射散热量。

$$Q_{R,i} = 2l_{hp} \int_{x=0}^{x=L_f} \epsilon \sigma (T^4(x, \delta_f) - T_{\infty}^4) dx \quad (7)$$

## 2) 热管式辐射散热器的单元流体换热计算

热量由冷却剂传递到热管蒸发段外壁的过程中, 换热热阻分为两部分: (1) 冷却剂与冷却剂管道的对流换热; (2) 热量由冷却剂管内壁传递到冷却剂管外壁。则该过程总的换热热阻  $R_1^{[19]}$  为:

$$R_1 = \frac{1}{\pi d_{in} h_c l_p} + \frac{\ln(d_{out}/d_{in})}{2\pi \lambda_{cp} t_p} \quad (8)$$

式中:  $d_{in}$ 、 $d_{out}$ 、 $l_p$  和  $t_p$  分别为冷却剂管道内径、外径、长度和厚度,  $m$ ;  $\lambda_{cp}$  为冷却剂管道管壁径向导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $h_c$  为冷却剂管道管内换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ 。

再考虑热量由热管蒸发段外壁传递至裸碳纤维翅片翅根处的换热热阻  $R_2$ 。

$$R_2 = R_{hvp} + R_{hpc} + R_0 \quad (9)$$

设热量从热管蒸发段管壁外部传到热管蒸发段内表面过程中沿管壁径向的导热热阻为  $R_{hvp}$ , 则有:

$$R_{hvp} = \frac{\ln(d_{hpvo}/d_{hpvi})}{2\pi \lambda_{hp} t_{hpv}} \quad (10)$$

式中:  $d_{hpvi}$ 、 $d_{hpvo}$  和  $t_{hpv}$  分别为热管蒸发段内径、外径和管壁厚度,  $m$ ;  $\lambda_{hp}$  为热管管材径向导热系数,  $W/(m \cdot K)$ 。

热管吸液芯管芯的结构选择流动阻力小、毛细力大的干线芯管芯, 热管沿管径方向的热阻很小, 且由于热管沿轴向的等温性, 则可忽略热管工质从热管蒸发段到冷凝段的换热热阻。设热量从热管冷凝段管壁内部传到冷凝段外表面过程中沿管壁径向的导热热阻为  $R_{hpc}$ , 则有:

$$R_{hpc} = \frac{\ln(d_{hpcO}/d_{hpci})}{2\pi \lambda_{hp} t_{hpc}} \quad (11)$$

式中,  $d_{hpci}$ 、 $d_{hpcO}$  分别为热管冷凝段内径、外径,  $m$ 。

设热量通过热管冷凝段外壁与翅片连接的钎焊层的导热热阻为  $R_0$ , 则:

$$R_0 = \frac{1}{2\pi \lambda_0 t_0} \quad (12)$$

式中:  $\lambda_0$  为钎焊层材料径向导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $t_0$  为钎焊层厚度,  $m$ 。

则冷却剂传递到裸碳纤维翅片翅根总换热热阻  $R$  可由下式计算:

$$R = R_1 + R_2 \quad (13)$$

## 3) 热管式辐射散热器系统热分析

已知热管式辐射散热器冷却剂入口温度  $T_{f1,1}$  及总设计散热功率  $Q_0$ , 采用迭代法从第 1 个热管式辐射散热器单元开始计算, 对热管式辐射散热器系统进行热分析。

假设第  $i$  个热管式辐射散热器单元冷却剂出口温度为  $T_{f2,i}$ , 根据式(14)可计算热管式辐射散热器单元单位时间内从冷却剂吸收的热量  $Q_i$ , 由式(5)可计算裸碳纤维翅片翅根温度  $T_r$ , 进而由式(7)可求得热管式辐射散热器单元的辐射散热量  $Q_{R,i}$ 。

$$Q_i = c_p m (T_{f1,i} - T_{f2,i}) \quad (14)$$

若辐射散热器单元的散热量之和  $\sum_{i=1}^i Q_{R,i}$  等于热管式辐射散热器总设计散热功率  $Q_0$ , 则计算完成。若计算得出的辐射散热器单元数量为  $N$ , 则热管式辐射散热器总面积  $A$  与总质量  $M$  可分别由式(15)、(16)计算:

$$A = N(2L_f + d_o)l_{hpc} \quad (15)$$

$$M = 2NL_f l_{hpc} \delta_f \rho_{fin} + N \frac{\rho_{hp} \pi l_{hp} ((d_o + \delta_{hp})^2 - d_o^2)}{4} \quad (16)$$

式中:  $\rho_{fin}$  为裸碳纤维翅片密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho_{hp}$  为热管材料密度,  $kg/m^3$ 。

## 3 分析及优化

### 3.1 热管式辐射散热器质量影响因素

选取冷却剂质量流量  $m$ 、裸碳纤维翅片长度  $L_f$ 、裸碳纤维翅片厚度  $\delta_f$ 、热管式辐射散热器入口温度  $T_{f1}$  为优化参数对热管式辐射散热器系统质量  $M$  进行优化。

#### 1) 翅片厚度 $\delta_f$

选取  $L_f = 5 \text{ cm}$ 、 $m = 7 \text{ kg/s}$ 、 $T_{f1} = 800 \text{ K}$ , 探讨  $\delta_f$  对  $M$  的影响, 结果示于图 4。使用钾作为冷却剂, 当  $\delta_f$  由  $0.1 \text{ mm}$  增加到  $0.9 \text{ mm}$  时,  $M$  先减小后增大, 当  $\delta_f$  为  $0.2 \text{ mm}$  时,  $M$  取得最小值  $972.9 \text{ kg}$ 。这是因为当  $\delta_f$  过小时, 由热管传递至裸碳纤维翅片的热量也很小, 导致裸碳

纤维翅片表面温度过低,热管式辐射散热器单元辐射散热量小,所需辐射单元数较多,故热管式辐射散热器系统总质量增加。

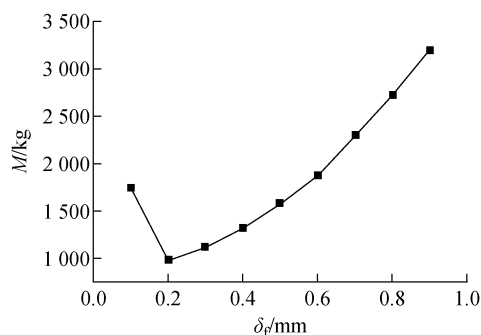


图 4  $\sigma_f$  对  $M$  的影响

Fig. 4 Effect of  $\sigma_f$  on  $M$

## 2) 翅片长度 $L_f$

选取  $\delta_f = 0.2 \text{ mm}$ 、 $m = 7 \text{ kg/s}$ 、 $T_{fi} = 800 \text{ K}$ , 探讨  $L_f$  对  $M$  的影响,结果示于图 5。从图 5 可看出,当  $L_f$  从 1.5 cm 到 9.5 cm 变化时,热管式辐射散热器质量呈现先减小后增大的趋势,当  $L_f$  为 5 cm 时热管式辐射散热器质量取得最小值 972.9 kg。这是由于  $L_f$  增加到一定程度时,裸碳纤维翅片热阻很大,外侧表面温度很低,导致其辐射能力变差。

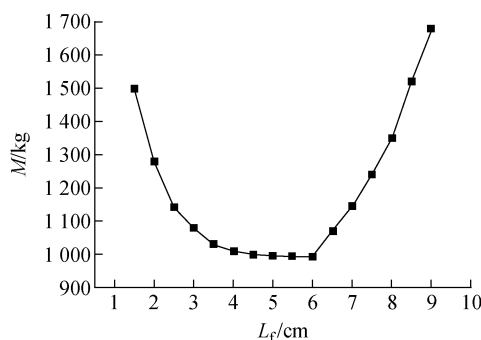


图 5  $L_f$  对  $M$  的影响

Fig. 5 Effect of  $L_f$  on  $M$

## 3) 冷却剂质量流量 $m$

选取  $\delta_f = 0.2 \text{ mm}$ 、 $L_f = 5 \text{ cm}$ 、 $T_{fi} = 800 \text{ K}$ , 探讨  $m$  对  $M$  的影响,结果示于图 6。当冷却剂质量流量  $m$  增大时,热量经由冷却剂至裸碳纤维翅根的  $R$  越小,则  $T_r$  越大,进而裸碳纤维翅片辐射热量越大,热管式辐射散热器系统质量

越小。当质量流量大于  $9 \text{ kg/s}$  时,热管式辐射散热器系统质量基本不变,考虑到泵功率不应超出核电源电功率的 5%,且当质量流量大于  $9 \text{ kg/s}$  时,热管式辐射散热器系统质量基本不变,则流量  $m$  取  $9 \text{ kg/s}$  为宜。

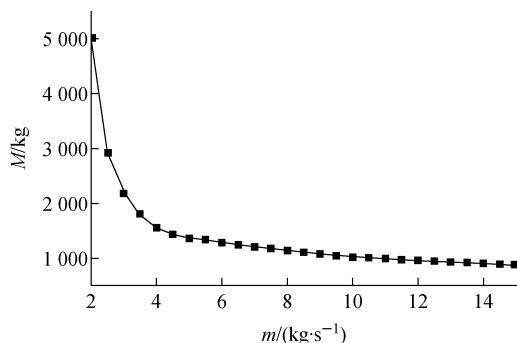


图 6  $m$  对  $M$  的影响

Fig. 6 Effect of  $m$  on  $M$

## 4) 入口温度 $T_{fi}$

选取  $\delta_f = 0.2 \text{ mm}$ 、 $L_f = 5 \text{ cm}$ 、 $m = 7 \text{ kg/s}$ , 探讨  $T_{fi}$  对  $M$  的影响,所得变化关系曲线如图 7 所示。当热管式辐射散热器入口温度  $T_{fi}$  增大时,  $T_r$  越大,裸碳纤维翅片辐射热量越大,热管式辐射散热器系统质量  $M$  越小。但依靠增加热管式辐射散热器入口温度  $T_{fi}$  来降低热管式辐射散热器系统质量制约因素很多,故结合前人设计经验热管式辐射散热器入口温度  $T_{fi}$  选择  $800 \text{ K}$  为宜。

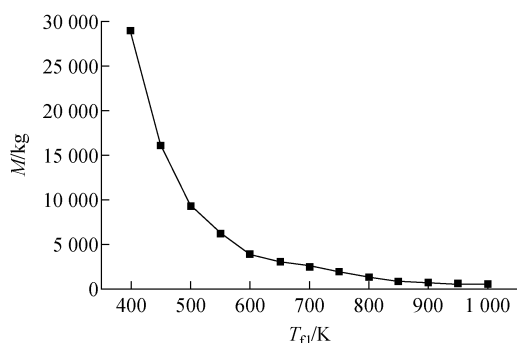


图 7  $T_{fi}$  对  $M$  的影响

Fig. 7 Effect of  $T_{fi}$  on  $M$

## 3.2 遗传算法对辐射散热器质量的优化

### 1) $L_f$ 变化时辐射散热器优化结果

在其他参数不变的情况下,选取裸碳纤维

翅片长度  $L_f$  为 4.5~5.5 cm, 利用遗传算法, 设置初始种群数  $n$  为 40、交叉率  $P_c$  为 0.7、变异概率  $P_m$  为 0.001 5、最大代数为 150、代沟  $G$  为 0.9, 得到的最终优化结果如图 8 所示。图 8 表明, 当  $L_f$  取 5 cm 时,  $M$  取得最小值 912.10 kg。遗传算法结果表明, 当  $L_f$  取 5.07 cm 时,  $M$  取得最小值 912.066 kg, 此结果表明  $L_f$  在 5 cm 附近时  $M$  取得最小值。

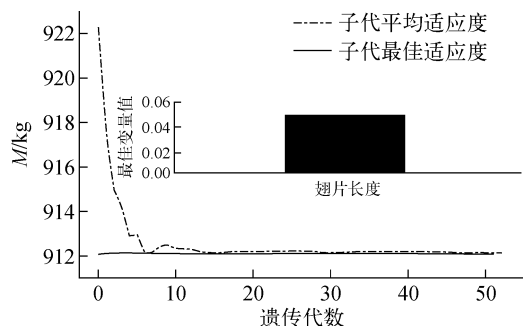


图 8 裸碳纤维翅片长度遗传算法优化结果  
Fig. 8 Optimization of genetic algorithm  
for bare carbon fiber fin length

## 2) $\delta_f$ 变化时辐射散热器优化结果

在其他参数不变的情况下, 选取  $\delta_f$  为 0.1~0.2 mm, 利用遗传算法, 设置遗传算法参数如前文所述, 得到优化结果如图 9 所示。

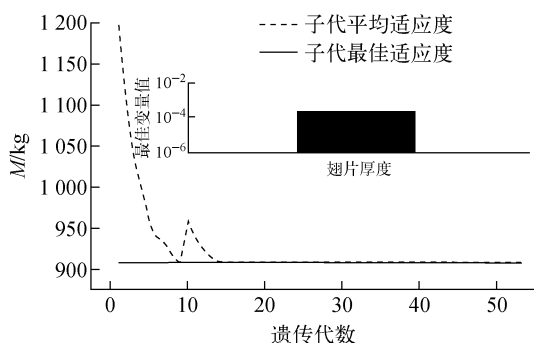


图 9 裸碳纤维翅片厚度遗传算法优化结果  
Fig. 9 Optimization of genetic algorithm  
for bare carbon fiber fin thickness

图 9 表明, 当  $\delta_f$  取 0.16 mm 时  $M$  取得最小值 907.816 kg。为更好地探讨辐射散热器的质量优化和对比分析, 采取多参数优化所得结果。

## 3) 多参数辐射散热器质量优化

选取  $L_f$  为 4.5~5.5 cm,  $\delta_f$  为 0.1~0.2 mm、

$m$  为 6~9 kg/s、 $T_{fi}$  为 400~800 K。设置遗传算法运行参数, 其中初始种群数  $n$  为 40、编码串长  $l$  为 37、交叉率  $P_c$  为 0.7、变异概率  $P_m$  为 0.001 5、最大代数为 150、代沟  $G$  为 0.9。变量与目标函数  $M$  的遗传算法如图 10 所示。

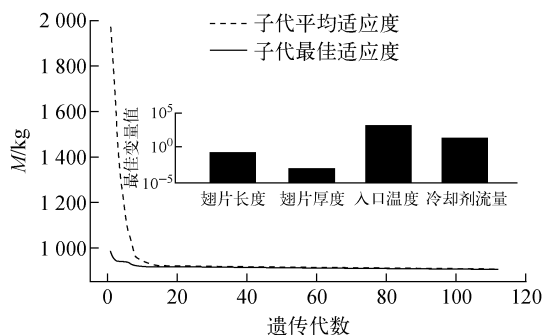


图 10 多变量遗传算法优化结果  
Fig. 10 Multivariate genetic algorithm  
optimization result

比较遗传算法和穷举法的结果可知: 对于穷举法, 当  $L_f$  取 5 cm、 $\sigma_f$  取 0.2 mm 时,  $M$  取得最小值 912.10 kg; 对于遗传算法, 当  $L_f$  取 5.07 cm、 $\delta_f$  取 0.16 mm、 $T_{fi}$  取 800 K、 $m$  取 9 kg/s 时,  $M$  取得最小值 906.593 kg, 优化了 0.63% 的系统质量。

## 4 结论

本文对 MW 级空间核反应堆系统的热管式辐射散热器进行了设计, 并以辐射散热器质量为优化目标, 在遗传算法的基础上研究了冷却剂质量流量  $m$ 、裸碳纤维翅片长度  $L_f$  和厚度  $\delta_f$  及辐射散热器入口温度  $T_{fi}$  对散热器质量  $M$  的影响, 得到以下结论:

1) 建立了热管式辐射散热器热阻分析数学模型, 计算得到了不同工况下辐射散热器的系统质量, 并给出了最优解;

2) 散热器质量  $M$  随质量流量  $m$ 、入口温度  $T_{fi}$  的增加而减小, 取  $m$  为 9 kg/s 时可获得较好优化结果;

3)  $M$  随  $L_f$  和  $\delta_f$  的增大呈先减小后增大的趋势,  $L_f$  为 5 cm 和  $\delta_f$  为 0.2 mm 时取得最小值 972.9 kg;

4) 当  $T_{fi}=800$  K、 $L_f=5$  cm、 $\delta_f=0.16$  mm、 $m=9$  kg/s 时,  $M$  最小, 此时  $M$  为 906.593 kg,

优化了 0.63% 的系统质量。

## 参考文献:

- [1] 苏著亭,杨继材,柯国土. 空间核动力[M]. 上海:上海交通大学出版社,2016.
- [2] TOURNIER J M P, EL-GENK M S. Reactor lithium heat pipes for HP-STMCs space reactor power system[C]// AIP Conference Proceedings. Albuquerque, New Mexico: American Institute of Physics, 2004: 781-792.
- [3] EL-GENK M S, TOURNIER J M P. "SAIR"—Scalable AMTEC integrated reactor space power system[J]. Progress in Nuclear Energy, 2004, 45(1): 25-59.
- [4] POSTON D I. The heatpipe-operated mars exploration reactor (HOMER) [R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [5] MASON L, CASANI J, ELLIOTT J, et al. A small fission power system for NASA planetary science missions[J]. Journal of the British Interplanetary Society, 2011, 64(3): 76-87.
- [6] 谢荣建. 地球静止轨道热控系统中热管辐射冷却器温控方案与性能研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2017.
- [7] 刘逍,张文文,王成龙,等. 空间堆辐射冷却器设计分析[J]. 原子能科学技术,2018,52(5):788-794.  
LIU Xiao, ZHANG Wenwen, WANG Chenglong, et al. Design of space reactor radiation radiator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(5): 788-794(in Chinese).
- [8] JEBRAIL F F, ANDREWS M J. performance of a heat pipe thermosyphon radiator[J]. International Journal of Energy Research, 2015, 21(2): 101-112.
- [9] BIEGER V R. Numerical modeling of heat pipe radiator and fin size optimization for low and no gravity environments[R]. Las Vegas: University of Nevada, 2013.
- [10] SAM K F C H, DENG Z. Optimization of a space based radiator[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(14-15): 2 312-2 320.
- [11] WENWEN Z, CHENGLONG W, RONGHUA C, et al. Preliminary design and thermal analysis of a liquid metal heat pipe radiator for TOPAZ-II power system[J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, 97: 208-220.
- [12] 李桂云,屠进. 高温热管工质的选择[J]. 节能技术,2001(19):2-3.
- [13] 谭拴斌,郭让民,杨升红,等. 钼铼合金的结构和性能[J]. 稀有金属,2003,27(6):788-793.  
TAN Shuanbin, GUO Rangmin, YANG Sheng-hong, et al. Structure and properties of molybdenum-rhenium alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(6): 788-793(in Chinese).
- [14] LIU C C, OU C L, SHIUE R K. The microstructural observation and wettability study of brazing Ti-6Al-4V and 304 stainless steel using three braze alloys[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37: 2 225-2 235.
- [15] HAMADA T, FURUYAMA M, SAJIKI Y, et al. Structures and electric properties of pitch-based carbon fibers heat-treated at various temperatures[J]. Journal of Materials Research, 1990, 5(3): 570-577.
- [16] WANG Chenglong, ZHANG Dalin, QIU Sui-zheng, et al. Study on the characteristics of the sodium heat pipe in passive residual heat removal system of molten salt reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 265: 691-700.
- [17] 张文文,刘逍,田文喜,等. 兆瓦级空间热管反应堆动力系统概念设计[J]. 原子能科学技术, 2017,51(12):2 160-2 164.  
ZHANG Wenwen, LIU Xiao, TIAN Wenxi, et al. Conceptual design of megawatt class space heat pipe reactor power system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(12): 2 160-2 164(in Chinese).
- [18] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006:249-250.
- [19] 刘逍,张文文,王成龙,等. 空间堆辐射散热器设计分析[J]. 原子能科学技术,2018,52(5):788-794.  
LIU Xiao, ZHANG Wenwen, WANG Chenglong, et al. Design of space reactor radiation radiator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(5): 788-794(in Chinese).