

兆瓦级空间核电源碱金属朗肯循环热电转换系统设计

张 震, 张昊春, 张 冬, 赵广播

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 为解决火星探测任务中存在的星表供电问题, 制定了以空间液态金属朗肯循环作为星表基地热电转换模块的任务规划, 采用 Simulink 模块化建模方法对空间液态金属朗肯循环模型进行程序化描述。根据空间朗肯循环各部件的耦合标准, 建立系统部件及总体控制仿真模型, 重点研究变运行条件下循环输出功率的波动。研究表明: 在本文各工况下, 朗肯循环动态热电转换仿真模型最终输出功率均可达到 1 MW 以上, 在额定工况下, 热电转换效率可达到 27.3%, 满足火星探测背景下的系统热发电功率要求。本文采用 Simulink 模块化建模方法, 可为空间核动力热电转换仿真技术提供指导, 相关研究成果可为未来中国火星探测计划提供参考。

关键词: 空间核电源; 液态金属朗肯循环; Simulink 仿真; 模块化建模; 动态热电转换

中图分类号: V 551

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.02.012

Design of Alkali Metal Rankine Cycle Thermoelectric Conversion System for Megawatt Space Nuclear Plant

ZHANG Zhen, ZHANG Haochun, ZHANG Dong, ZHAO Guangbo

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to solve the problem of catalogue power supply in Mars exploration missions, the planning of taking liquid metal Rankine cycle as the thermal power conversion module of Mars catalogue base is developed. The Simulink modular modeling method is used to program the liquid metal Rankine cycle model. According to the coupling standard of each component of the space Rankine cycle, the simulation models for the system components and overall control are established. The fluctuation of the cycle output power under variable operating conditions is studied. The results show that the final output power of the Rankine cycle dynamic thermoelectric conversion simulation model can reach more than 1 MW under various working conditions, and the thermoelectric conversion efficiency can reach 27.3% under the rated working conditions, which fully meets the thermal power requirements of the system under the background of Mars detection. The Simulink modular modeling method can provide guidance for space nuclear power thermoelectric conversion simulation technology, and the relevant research results can provide valuable reference for China's Mars exploration plan in the future.

Key words: space nuclear power; liquid metal Rankine cycle; Simulink; simulation; modular modeling; dynamic thermoelectric conversion

0 引言

作为一种持久、高效且可靠的空间电源, 空间核电源具有重量轻、体积小、功率大、抗辐射能力

强、使用寿命长等优点^[1], 适用于距离远、时间长的深空探测任务。发展空间核反应堆电源不仅符合航天长远发展的要求, 也是对核能应用领域的扩

收稿日期: 2021-07-17; 修回日期: 2021-08-20

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1901900); 国家科技重大专项(2019ZX06005001-001-001)

作者简介: 张 震(1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向空间核动力。

通信作者: 张昊春(1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向工程热力学、新型热控技术、先进能源系统。

展^[2]。1965年,全球第一个空间核反应堆 SNAP-10A(0.5 kWe)成功进入太空,自此,美国和俄罗斯这2个航天大国竞相在空间核电源领域展开研究,并取得了多项成果^[3]。自2006年以后,美国开启了千瓦级核电源计划;自2009年以后,俄罗斯开启了兆瓦级空间核动力飞船研发计划。自21世纪以来,空间核电源的应用场合主要包括:为大功率(100 kW以上)的近地航天器、功率较大的深空探测器和月球火星等星球的星表空间基地供电^[4]。

作为空间核电源的重要组成部分,热电转换模块主要有静态热电转换和动态热电转换这两种。其中,核能静态能量转换供能系统试验已在美国和俄罗斯取得成功,并用于为在轨运行卫星提供能量。由于系统中的运动部件相对较少,静态转换系统具有稳定性高的特点^[5]。静态热电转换具有代表性的是美国 SP-100 空间核反应堆,被设计作为一种轨道电源、月球或火星表面电站,其功率范围为几十千瓦到几百千瓦^[6]。最初,SP-100是专门为20世纪80年代美国“星球大战”(Strategic Defense Initiative, SDI)开发的轨道电源^[7]。其通过静态热电转换发电,设计了包括6条铯回路及1套钠钾辅助回路,由二回路的铯回路及辐射器排出废热。该项目要求在10 a左右完成,且可以自主完成反应堆启停。系统总质量约为4.6 t^[8]。在动态热电转换领域,朗肯循环无疑是其中极具代表性的一种热电转换形式。1971年,BEVERIDGE^[9]首次提出用1个堆芯连接管元件,从而完成闭环系统内的热量交换,并利用朗肯循环成功实现发电量25 kW。作为动态热电转换形式,朗肯循环的转换效率可达25%以上,并可以装配质量较小的辐射散热器,主要应用场合包括空间推进和星表发电。从1960年以后,朗肯循环逐渐开始出现在人们的视野中,美国的橡树岭国家实验室在其 SPUR 和 MPRE 等项目中对其进行了研究^[10]。1989年,美国能源部投资启用了1个5 MWe的液态金属钾朗肯循环系统^[11],该研究主要探讨了空间核电源的安全性、可靠性和质量优化等问题^[12]。

本文针对中国的火星星表基地任务规划问题,基于空间液态金属朗肯循环发电系统,利用 Simulink 模块化仿真实现了在探火空间背景下的热电转换系统开发,通过电池系统与涡轮发电系统的耦合实现宽功率能量输出。由于地面试验难以满足设计要求且成本巨大,因此采用准确有效的数值模拟

方法是设计的重要一环^[13]。本文以热电转换系统设计为基础,建立系统部件及总体控制仿真模型,研究变运行条件下循环输出功率的波动,为我国火星星表基地电力系统的建立提供参考。

1 空间液态金属朗肯循环系统

1.1 循环特性分析

以碱金属为循环工质的液态金属朗肯循环在900~1 500 K之间的循环特性和经济性远远优于布雷顿循环^[14-16]。相较于布雷顿循环,液态金属朗肯循环的效率更高,使用液态金属工质,如Na、K等,其结构也更简单^[17],适用范围更广,不仅可以用于空间探测,在星表电力供应方面也有不俗的表现。本文基于火星星表基地建立的实际空间背景,发电系统热电转换部分选择了液态金属朗肯循环,其热效率高,设备安全性能好,系统运行稳定,可以更好地适应航天系统的模块化制造。朗肯循环可以简化为4部分:1) 蒸汽发生装置,为核电厂加热装置;2) 汽轮机,用于高温高压蒸汽的热力学能转化为机械能;3) 冷凝器,为乏汽凝结成饱和和液态工质的换热装置;4) 工质泵,用于提高循环工质压力,通过将冷凝器中循环工质重新注入蒸发器,完成1个循环。朗肯循环的简单示意图如图1所示。

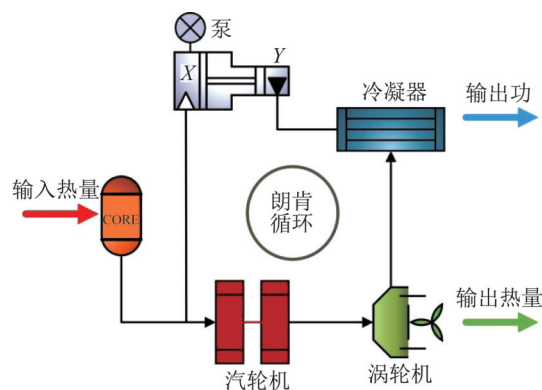


图1 液态金属朗肯循环系统基本装置

Fig.1 Flow chart of the liquid metal Rankine cycle system

1.2 Simulink 仿真

Simulink 是对于动态系统(包括连续系统、离散系统和混合系统)进行建模、仿真和整体分析的集成软件工具包,是 Matlab 的重要子软件之一^[18]。其为系统设计与控制的开发提供了直观、便捷、交

互式的图形化集成仿真环境,受到科研人员的青睐^[19]。空间液态金属朗肯循环是空间核电源的关键组成部分,受外部实验条件的限制,在研究初期,对其进行实验的成本过高,因此,利用仿真软件进行模拟分析尤为重要。在建立空间液态金属朗肯循环仿真模型时,传统的仿真软件只能对其部分功能进行仿真,无法对系统整体进行有效评估。因此,本文采用自主搭建的空间液态金属朗肯循环 Simulink 仿真模型进行研究,分析了变运行条件对循环输出功率的影响。对朗肯循环各主要部件进行模块化建模,进而耦合各部件以实现整体功能,可有效简化建模过程并尽可能提高仿真的准确性。

2 空间液态金属朗肯循环系统建模

利用模块化建模的方法,采用 2 层模型进行封装:第 1 层为空间液态金属朗肯循环系统整体模型,第 2 层为主要部件模型。将液态金属朗肯循环发电系统分解为 4 个主要模块:液态金属汽轮机、蒸汽发生器、冷凝器和工质泵。根据各主要设备的工作机理,从质量守恒、能量守恒、热力学定律和传热方程出发,建立了金属工质汽轮机、蒸发器、冷凝器和工质泵的数理模型。

循环系统的主要参数根据中国核动力研究设计院合作项目“兆瓦级天基核动力系统热电转换关键技术研究”而定,其额定参数见表 1,工况参数见表 2。

表 1 空间朗肯循环额定参数表

Tab. 1 Rated parameters of the space Rankine cycle

额定参数	相应数值
额定功率/MW	1.1
蒸发压力/MPa	1.59
冷凝压力/MPa	0.15
循环工质	Na
导热工质	K
工质流量/(kg·s ⁻¹)	10.0
循环效率/%	27.3

2.1 蒸汽发生器建模

液态金属朗肯循环蒸汽发生器是包含 2 条流体换热通道的换热场所,即工作流体(循环工质)路径和碱金属路径。工作流体在蒸汽发生器中经历加热、蒸发和过热这 3 个阶段,其状态从不饱和液态变

表 2 空间朗肯循环部件工况参数表

Tab. 2 Working condition parameters of the space Rankine cycle components

工况点	温度 T/K	压力 P/MPa
汽轮机进口(蒸发器出口)	1 500	1.584
汽轮机出口(冷凝器入口)	1 050	0.120
冷凝器出口(泵入口)	950	0.108
泵出口(蒸发器入口)	1 450	1.592

为饱和液态,再从饱和液态变为饱和气态,最后从饱和和气态变为过热蒸汽;其相态的变化是由单相态变为两相态,再由两相态变为单相态。而碱金属在蒸汽发生器中将热量传递给工作流体,温度不断降低,但其状态未发生变化。本章根据质量守恒和能量守恒关系,通过集总参数法建立模型状态方程。

基本假设:1) 将换热器视为 1 个换热管并联而成的单通道热管,工质进行一维流动;2) 忽略换热器内压降的影响,认为压力仅与时间项相关;3) 忽略换热管道内部的轴向导热,认为管壁与工质之间只存在径向传热;4) 忽略工质重力势能。

质量连续方程为

$$\frac{\partial \rho_f A_f}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

热交换器进出口流量为

$$W_{a_1} = W_{a_2} \quad (2)$$

热交换器进出口总压为

$$P_{t_2} = P_{t_1} \quad (3)$$

本文采用 ϵ -NTU(效能-传热单元数)法计算换热器出口温度:

$$N_{NTU} = \frac{KA}{(mc_p)_{\min}} \quad (4)$$

式中: K 为传热系数; A 为换热面积,参考相关文献可得本文的 KA 值为 90; $(mc_p)_{\min}$ 为冷段和热段中流量与定压比热容之积的最小值。

本文所采用间壁式换热器的效能计算公式为

$$\epsilon = 1 - \exp(-N_{NTU}) - \exp\left[-(1 + C^*)N_{NTU}\right] \sum_{n=1}^{\infty} (C^*)^n P_n(N_{NTU}) \quad (5)$$

式中:级数 $P_n(x)$ 和 C^* 为

$$P_n(x) = \frac{1}{(n+1)!} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{n+1-j}{j!} x^{n+j} \quad (6)$$

$$C^* = \frac{(mc_p)_{\min}}{(mc_p)_{\max}} \quad (7)$$

当求出 ϵ 与 N_{NTU} 后,由效能定义可得

$$\epsilon = \frac{(T - T^*)_{\max}}{(T_1^* - T_2^*)} \quad (8)$$

式中: $(T_1^* - T_2^*)$ 为蒸汽发生换热器中可能发生的最大温度差值; $(T - T^*)_{\max}$ 为冷流体或者热流体在换热器中实际温差值中的较大者,即可求得热端出口温度 T_{q2} 。

对于碱金属侧,在流体从入口流入再流出换热器的过程中无相变发生;工作流体侧处于气液共存

的两相状态,为使计算更接近实际,使用空泡系数的概念求取两相区域内工质的平均参数。单相区的集总参数由工质在相区进出口比焓的平均值及相应压力确定,两相区的集总参数通过空泡系数 γ 近似计算如下:

$$\rho = \bar{\gamma} \rho'' h'' + (1 - \bar{\gamma}) \rho' h' \quad (9)$$

$$\rho h = \bar{\gamma} \rho'' h'' + (1 - \bar{\gamma}) \rho' h' \quad (10)$$

式中:上标“'”“''”分别为饱和液参数和饱和气参数。

蒸汽发生器模块输入参数为 K 和 Na 这 2 种循环工质的温度及质量流量,输出参数为 Na 的温度。其余参数均置于循环内部,不在外部接口显示。蒸发器第 2 层的 Simulink 模型如图 2 所示。

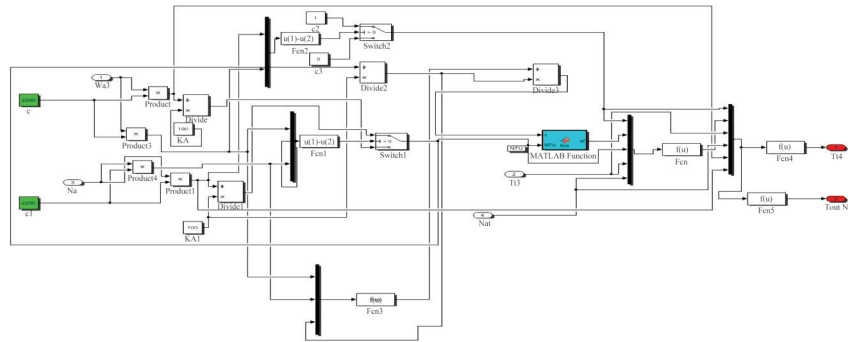


图 2 蒸发器第 2 层模型

Fig. 2 The second layer model of the evaporator

2.2 循环工质泵建模

工质泵是空间液态金属朗肯循环的主要压缩部件,作用是提高循环工质的压力,使工质在管道内流动时可达到一定的流速。工质泵的流动较复杂,为简化计算,采用稳态模型对工质泵进行建模。忽略泵进出口流速及高度的差别,泵的折合转速为

$$N_{hcor} = \left(N_h / \sqrt{T_{p1}} \right) / \left(N_{hd} / \sqrt{T_{p2d}} \right) \quad (11)$$

式中: T_{p1} 为工质泵进口总温; N_{hd} 为工质泵设计点转速; T_{p2d} 为工质泵进口设计点总温。

工质泵特性插值为

$$\pi_c = P_{p3} / P_{p1} \quad (12)$$

根据 N_{hcor} 和 π_c 在工质泵特性图中插值,得出折合流量和效率 $W_{a_{c,cor}}$ 、 η_c 如下:

$$\begin{cases} W_{a_{c,cor}} = f_1(N_{hcor}, \pi_c) \\ \eta_c = f_2(N_{hcor}, \pi_c) \end{cases} \quad (13)$$

式中: f_1 、 f_2 为工质泵的特性插值函数,采用 Matlab 中的自定义模块实现。

工质泵进口流量、出口总温及功率如下:

$$W_{a2} = W_{a_{c,cor}} \frac{P_{p2}}{101325} \sqrt{\frac{T_{re}}{T_{p2}}} \quad (14)$$

$$T_{t3} = T_{p2} \left(\frac{\pi_c^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\eta_c} + 1 \right) \quad (15)$$

$$Q_c = W_{a2} \times C_p (T_{p3} - T_{p2}) \quad (16)$$

工质泵出口流量为

$$W_{a3} = W_{a2} \quad (17)$$

综上所述,工质泵的数学模型可由折合转速、进出口流量、温度和功率公式来描述。工质泵的仿真模型采用稳态模型,工质泵仿真模型的输入参数为泵的设计点转速 N_{hd} 、金属工质流体的进口温度及压力。工质泵仿真模型第 2 层的 Simulink 模块如图 3 所示。

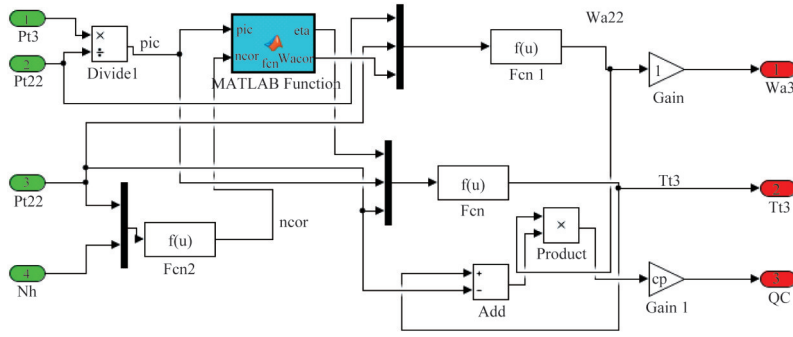


图 3 工质泵第 2 层模型

Fig. 3 Schematic diagram of the second layer model of the working medium pump

2.3 冷凝器建模

高温高压的金属工质在汽轮机中膨胀做功后转变为低温低压的蒸汽,随后进入冷凝器中冷却成液态工质。循环工质先后经历冷却、冷凝和过冷这 3 个阶段。其状态变化是从过热蒸汽态变成饱和蒸汽态,再从饱和蒸汽态变为过冷态。而冷却液在冷凝器中吸收循环工质的余热,温度不断升高,没有发生相变。对冷凝器的整个冷却区用能量守恒方程及质量守恒方程如下:

$$\begin{cases} \rho_a \frac{dV_a}{dt} + V_a \left(\frac{dP}{dt} \alpha_{11} + \alpha_{12} \frac{dh_{in}}{dt} \right) = m_{in} - m_g \\ \rho_s u_s \frac{dV_s}{dt} + V_s \left(b_{11} \frac{dP}{dt} + b_{12} \frac{dh_{in}}{dt} \right) = \\ m_{in} h_{in} - m_g h_g + Q_s \end{cases} \quad (18)$$

对冷凝器的整个冷凝区应用能量守恒及质量守恒方程如下:

$$\begin{cases} \rho_b \frac{dV_b}{dt} + V_b \alpha_{21} \frac{dP}{dt} = m_g - m_f \\ \rho_b u_b \frac{dV_b}{dt} + V_b \alpha_{22} \frac{dP}{dt} = m_g h_g - m_f h_f + Q_s \end{cases} \quad (19)$$

对冷凝器的整个过冷区工质应用能量守恒及

质量守恒方程:

$$\begin{cases} \rho_e \frac{dV_e}{dt} + V_e \left(\frac{dP}{dt} \alpha_{31} + \alpha_{32} \frac{dh_{out}}{dt} \right) = m_f - m_{out} \\ h_{st} = h_{out} - h_{in} = \frac{h_{cs}(P_1, h_{in}, P_2) - h_{in}}{\eta_c} \end{cases} \quad (20)$$

各区系数 α 由状态参数如下:

$$\begin{cases} \alpha_{11} = f_1^*(\rho, P, h); \alpha_{13} = f_2^*(\rho, P, h) \\ \alpha_{21} = f_3^*(\rho, P, h); \alpha_{13} = f_4^*(\rho, P, h) \\ \alpha_{31} = f_5^*(\rho, P, h); \alpha_{33} = f_6^*(\rho, P, h) \end{cases} \quad (21)$$

且满足

$$\begin{cases} b_{11} = u_a \alpha_{11} + \rho_a \alpha_{13}; b_{12} = u_a \alpha_{12} + \rho_a \alpha_{14} \\ b_{31} = u_e \alpha_{31} + \rho_e \alpha_{33}; b_{32} = u_e \alpha_{12} + \rho_e \alpha_{14} \end{cases} \quad (22)$$

液态金属朗肯循环冷凝器模型建模方法与蒸汽发生器模型建立方法类似,均为间壁式换热器,采用集总参数法建模,消去中间参数可得封闭方程组。冷凝器的输入参数为冷却液的质量流量以及冷却液进口温度,金属工质 Na 的质量流量及进口温度由上一级输出给出;出口参数为工作流体金属工质 Na 的出口温度。冷凝器第 2 层 Simulink 模型如图 4 所示。

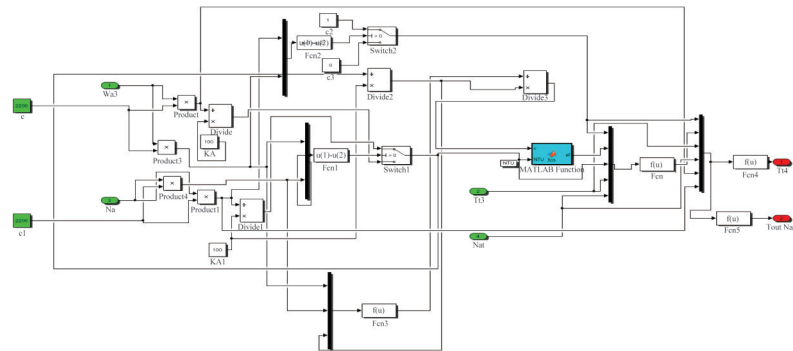


图 4 冷凝器第 2 层模型

Fig. 4 Schematic diagram of the second layer model of the condenser

2.4 汽轮机建模

汽轮机是透平机械的一种(透平一词来源于 Turbine 的音译,其含义是一种旋转式的流体动力机械),用于促使气体热能与机械功发生相互转化。空间液态金属朗肯循环汽轮机是以蒸汽为工质,将蒸汽的热能转化为机械功的热力透平。温度 T_0 、压力 P_0 的气体以速度 C_0 进入进气管,再进入导向装置膨胀加速,速度增大至 C_1 ,压力和温度分别为 P_1 和 T_1 。最后,气流进入高速旋转的动叶,膨胀做功,在动叶出口的速度、温度和压力分别为 C_2 、 T_2 和 P_2 。

在这一过程中,可得单位工质的焓降为

$$h_{st} = h_{out} - h_{in} = \frac{h_{cs}(P_1, h_{in}, P_2) - h_{in}}{\eta_c} \quad (23)$$

汽轮机的折合转速为

$$N_{hcor} = (N_h / \sqrt{T_{t_i}}) / (N_{hd} / \sqrt{T_{t_{i,d}}}) \quad (24)$$

式中: T_{t_i} 为汽轮机进口总温; N_{hd} 为汽轮机设计点转速; $T_{t_{i,d}}$ 为汽轮机进口设计点总温。

汽轮机的特性插值为

$$\pi_{t,h} = \frac{p_{t_i}}{p_{t_{i,1}}} \quad (25)$$

根据 N_{hcor} 、 $\pi_{t,h}$ 在涡轮特性图中插值,可以得出折合效率和折合流量 $\eta_{t,h}$ 、 $W_{a_{i,cor}}$ 如下:

$$\begin{cases} \eta_{t,h} = f_1(N_{hcor}, \pi_{t,h}) \\ W_{a_{i,cor}} = f_2(N_{hcor}, \pi_{t,h}) \end{cases} \quad (26)$$

式中: f_1 、 f_2 为汽轮机的特性插值函数,采用 Matlab 中的相应模块 Lookup Table 实现。

在金属工质汽轮机效率一定时,金属工质蒸汽所做的膨胀功跟其质量流量和比焓降成正比:

$$P_T = \eta \times \dot{m} \times h_{s,T} \quad (27)$$

汽轮机进口流量、出口流量以及汽轮机功率的关系为

$$W_{a_i} = W_{a_{i,cor}} \frac{P_{t_i}}{\sqrt{T_{t_i}}} / \frac{P_{t,ref}}{\sqrt{T_{t,ref}}} \quad (28)$$

式中: $T_{t,ref}$ 、 $P_{t,ref}$ 为设计点汽轮机的进口总温度和总压力。

$$T_{t_{i,1}} = T_{t_i} \left[1 - \left(1 - (\pi_{t,h})^{\frac{1-\kappa'}{\kappa'}} \right) \eta_{t,h} \right] \quad (29)$$

$$Q_{t,h} = W_{a_i} \times C_p (T_{t_i} - T_{t_{i,1}}) \quad (30)$$

汽轮机出口流量为

$$W_{a_{i,1}} = W_{a_i} \quad (31)$$

空间液态金属朗肯循环汽轮机的仿真模型也采用稳态模型,汽轮机仿真模型的输入参数为泵的给定转速 N^* 、金属循环工质的进口温度及压力。汽轮机仿真模型第 2 层的 Simulink 模块如图 5 所示。

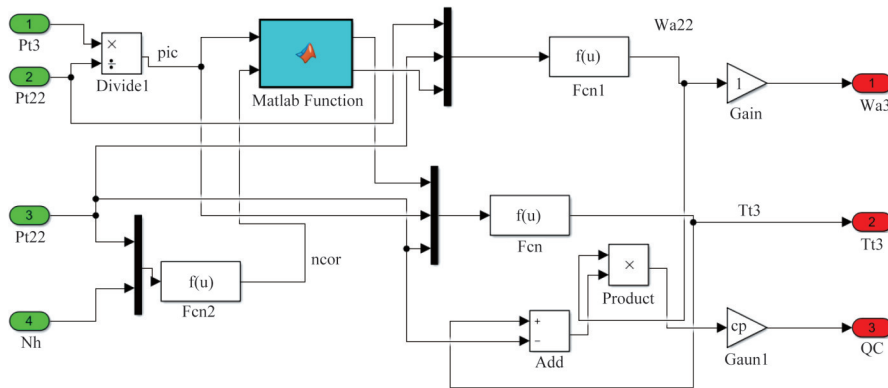


图 5 汽轮机第 2 层模型

Fig. 5 Schematic diagram of the second layer model of the steam turbine

2.5 朗肯循环整体建模

朗肯循环系统的综合仿真模型由金属工质汽轮机、蒸发器、冷凝器和工质泵这 4 个主要模块组成。各个模块的输入和输出参数互相耦合,形成闭

环系统。通过迭代计算获得朗肯循环净输出功率,对液态金属朗肯循环系统的运行特性进行分析,主要部件参数之间的关系如下:

1) 蒸发器出口工质的质量流量与汽轮机入口工质的质量流量相等,蒸发器出口工质的比焓与汽

轮机入口工质比焓相等。

2) 金属工质汽轮机出口工质的质量流量与冷凝器入口工质的质量流量相等,金属工质汽轮机的出口工质比焓与冷凝器的入口工质比焓相等。

3) 冷凝器出口工质的质量流量与工质泵入口工质的质量流量相等,冷凝器出口工质的比焓与工质泵入口工质的比焓相等。

4) 工质泵出口工质的质量流量与蒸发器入口工质的质量流量相等,工质泵出口工质的比焓与蒸发器入口工质的比焓相等。

将各部件仿真模块按以上关系进行连接,构建出液态金属朗肯循环的综合仿真模型,如图 6 所示。

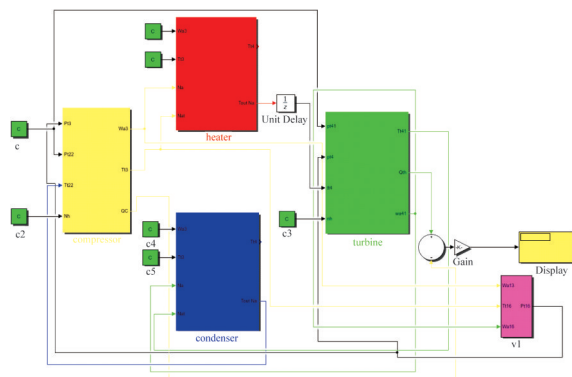


图 6 朗肯循环系统 Simulink 综合仿真模型

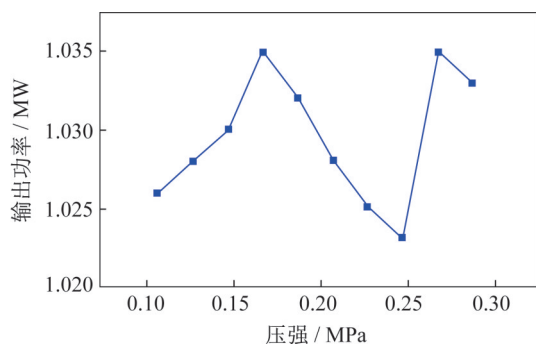
Fig. 6 Simulink comprehensive simulation model of the Rankine cycle system

3 仿真结果及分析

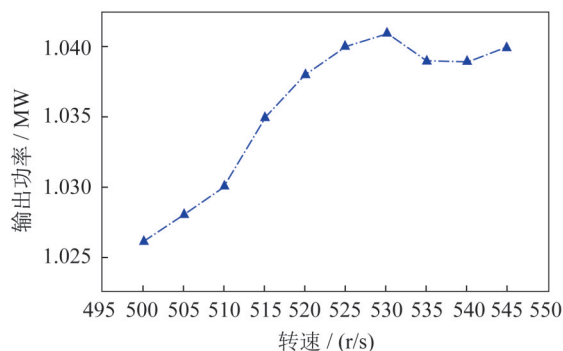
在 Simulink 环境下,通过改变不同输入值进行对比分析,可得到相应的输出曲线,便于进行现实中难以完成的实验,节约成本,为后续实验、系统设计、评价及优化提供指导。为了研究金属朗肯循环系统的循环性能,本文通过调节系统综合模型中相应的输入参数,对系统的整体特性进行仿真评估。

3.1 工质泵受到扰动时的输出功率波动

当蒸汽发生器、汽轮机和冷凝器在额定工况下运行时,由于实际执行任务中的堆芯输出参数产生浮动,使得工质泵入口端参数在一定范围内发生变化。在工质泵受到扰动时,系统输出功率随外界条件发生变化,其仿真结果曲线如图 7 所示。



(a) 输出功率随工质入口压强变化



(b) 输出功率随工质泵转速变化

图 7 系统输出功率随工质泵参数变化曲线

Fig. 7 Curves of the system output power versus various working fluid pump parameters

输出功率随工质入口压强发生变化情况如图 7(a) 所示。仿真中,工质流量为 10 kg/s,转速为 500 r/s,其余保持设计值。由图可知,随工质泵入口处工作流体压强从 0.1~0.3 MPa 之间逐渐开始增大,工质泵输出功率呈先上升后下降的趋势,变化幅度保持在 0.01 MW 以内,且在 0.25 MPa 左右时输出功率达到最低值。输出功率随泵转速发生变化情况如图 7(b) 所示。仿真中,入口处工质流量为 10 kg/s,压强为 0.108 MPa,其余保持设计值。由图可知,工质泵转速从 500 r/s 开始逐渐增大,工质泵输出功率呈上升趋势,变化幅度在 530 r/s 后呈缓慢上升趋势。

3.2 蒸汽发生器受到扰动时的输出功率

当工质泵、汽轮机和冷凝器在额定工况下运行时,在实际执行任务中,蒸汽发生器参数在一定范围内发生变化。在蒸汽发生器受到扰动时,系统输出功率随外接端口输入参数发生变化,其仿真结果曲线如图 8 所示,冷却工质的质量流量为恒定值,研究系统输出功率随高温侧液态金属 K 的温度发生变化。

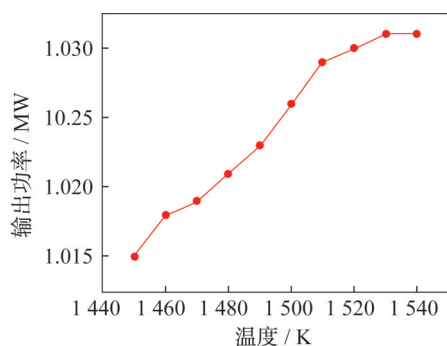


图8 系统输出功率随蒸汽发生器参数变化曲线

Fig. 8 Curve of the system output power versus the steam generator parameter

图8给出了系统输出功率随蒸汽发生器参数变化曲线的仿真结果,其循环工质质量流量为10 kg/s,入口端压强为1.592 MPa,其余各参数保持设计值。由图可知,系统输出功率随蒸汽发生器高温侧导热液温度升高而增大,当温度由1450 K上升至1510 K时,系统输出功率上升趋势变缓。其主要因为:当高温侧热源温度持续升高时,系统输出功率和循环效率均会在一定范围内呈上升趋势,但由于材料限制等因素,高温侧热源温度应控制在合理范围内。

为当高温侧入口温度为1500 K时,系统Simulink模型的仿真结果如图9所示。

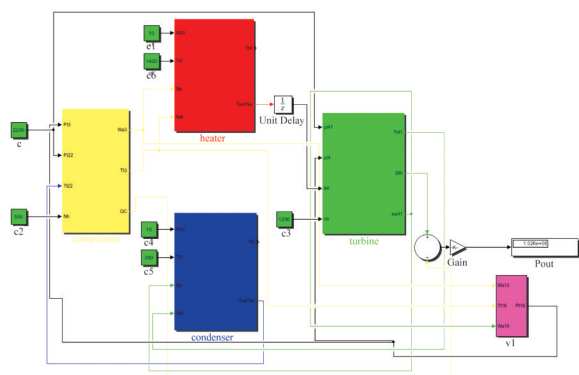


图9 入口温度为1500 K时系统Simulink模型的仿真结果

Fig. 9 Simulation result of the system Simulink model at the inlet temperature of 1500 K

3.3 冷凝器受到扰动时的输出功率

当工质泵、汽轮机、蒸汽发生器在额定工况下运行时,在实际执行任务中,受到外界扰动,冷凝器运行参数会在一定范围内发生变化。在冷凝器受到扰动时,系统输出功率随外接端口输入参数发生变化,其仿真结果曲线如图10所示。冷却工质的质量流量为

恒定值,研究系统输出功率随冷却工质温度的变化。

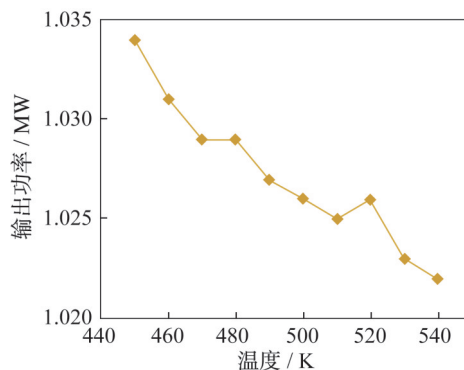


图10 系统输出功率随冷凝器参数变化曲线

Fig. 10 Curve of the system output power versus the condenser parameter

图10给出了0.12 MPa下系统输出功率随冷凝器冷却液温度变化曲线的仿真结果,循环工质参数保持设定值。由图可知,冷却液温度从450~540 K开始变化,系统输出功率从1.034 MW左右开始下降,直至1.022 MW左右,且下降幅度较大。其主要因为:冷端温度上升,系统整体的循环效率随之下降,输出功率也随之呈现明显的下降。综上可知,在系统材料允许的范围,为提高系统输出功率,应尽量降低冷凝器中的冷却液温度。在模拟过程中,随着温度上升,系统输出功率在某特定段呈小幅上升,这可能是因为冷凝器与其余部件相串联,由其余部件参数变化引起的。

高温侧导热液温度及冷却工质温度与系统输出功率关系如图11所示,更直观地反映输出功率随其主要限制因素发生变化的情况。

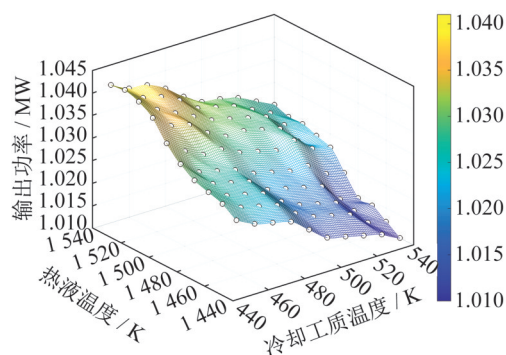


图11 系统输出功率随温度参数变化曲线

Fig. 11 Curve of the system output power with the temperature parameters

4 结束语

通过对空间液态金属朗肯循环 Simulink 仿真系统输出功率随各部件参数发生变化的曲线进行分析,可得到如下结论。

1) 针对探火背景下的系统热发电功率要求,本部分朗肯循环动态热电转换仿真模型最终输出功率在各研究工况下均可达到 1 MW 以上,满足火星表基地的功率需求。

2) 利用控制变量法,研究了朗肯循环热电转换各模块受到扰动时的输出功率问题。受到扰动时系统输出功率的仿真结果表明,随工质泵入口处工作流体压强从 0.1 ~ 0.3 MPa 逐渐增大,工质泵输出功率呈先上升后下降趋势,其变化幅度保持在 0.01 MW 以内,且在 0.25 MPa 左右时,输出功率达到最低值;输出功率随蒸汽发生器高温侧导热液温度升高而增大;随冷却液温度从 450 ~ 540 K 开始变化,系统输出功率由 1.034 MW 左右开始下降,直至 1.022 MW 左右,并呈现较快幅度的下降。

3) 工质泵受到扰动时,随入口处循环工质 Na 压强的增大,系统输出功率在 1.3 MW 附近波动,并在压强为 0.25 MPa 时达到最低值,但仍超过 1.025 MW;随工质泵转速增大,系统输出功率在一定范围内呈增大趋势,最终稳定在 1.04 MW 左右,实际设计中转速可设定为 535 r/s 左右,以提高系统循环效率。

4) 随蒸汽发生器高温侧钾温度从 1 440 K 上升至 1 550 K,输出功率从 1.015 MW 左右上升至 1.3 MW 以上,但是考虑到实际材料的寿命及承受极限,应根据实际情况确定蒸汽发生器工作温度。

5) 随冷凝器热阱温度从 450 K 增大至 540 K,系统输出功率从 1.034 MW 下降至 1.022 MW 左右。

参考文献

- [1] 伍浩松. 美国空间放射性同位素电力系统发展概述[J]. 国外核新闻, 2012(10): 28-32.
- [2] 贺克羽, 陈章隆, 闫锋哲. 空间核反应堆电源的应用与需求[J]. 电源技术, 2020, 44(1): 142-144.
- [3] 缪力威. Kilopower 与 KRUSTY 的发展脉络及研发现状[J]. 科技创新导报, 2020, 17(17): 65-69.
- [4] 张昊春, 张秀, 刘秀婷, 等. 空间堆碱金属热电转换系统性能分析与优化[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(2): 277-284.
- [5] 何宇豪, 孟涛, 卢瑞博, 等. 空间核反应堆电源研究进展[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 126-133.
- [6] 张秀, 张昊春, 刘秀婷, 等. 空间核电源热管式辐射散热器热分析与参数优化[J]. 宇航学报, 2019, 40(4): 452-458.
- [7] YONAS G. Research and the strategic defense initiative[J]. International Security, 2011, 11(2): 185-189.
- [8] AFTERGOOD S. Background on space nuclear power[J]. Science and Global Security, 1989, 1(1/2): 93-107.
- [9] BEVERIDGE J. Feasibility of using a nuclear rocket engine for electrical power generation[C]// 4th Fluid and Plasma Dynamics Conference. Palo Alto, CA, USA: AIAA, 1971: 39.
- [10] LONGHURST G R, SCHNITZLER B G, PARKS B T. Multi-megawatt power system trade study[J]. AIP Conference Proceedings, 2001, 608(1): 1075-1083.
- [11] DUDZINSKI L A, HAMLEY J A, SUTLIFF T J, et al. NASA's radioisotope power systems program status[C]// 12th International Energy Conversion Engineering Conference. Cleveland, OH, USA: AIAA, 2014: 3462-3470.
- [12] 刘秀婷, 张昊春, 尹德状, 等. 基于液态金属朗肯循环的空间双模式核热推进系统性能分析[J]. 热科学与技术, 2020, 19(5): 444-450.
- [13] 荣吉利, 崔硕, 石文静, 等. 大型空间电站在轨展开与组装动力学与控制[J]. 宇航学报, 2021, 42(3): 295-304.
- [14] NAM S H, VENNERI P, KIM Y, et al. Innovative concept for an ultra-small nuclear thermal rocket utilizing a new moderated reactor[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2015, 47(6): 678-699.
- [15] FEHER E G. The supercritical thermodynamic power cycle[J]. Energy Conversion, 1968, 8(2): 85-90.
- [16] THOMPSON D A, RIFFLE G K, MERDICH J A. Description of the cryogenic and hot-hydrogen test facility being developed for the space nuclear thermal propulsion (SNTTP) program[R]. AIAA, 1993.
- [17] PONOMAREV-STEPNOY N N, RANCHUK V S, SMETANNIKOV V P, et al. Space nuclear power and propulsion plants based on solid core nuclear reactor with external power conversion unit[C]// International Conference of Nuclear Energy in Space 2005. 2005: 1-3.
- [18] 牛宝良. 基于仿真的动态环境试验设备系统设计[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 1-10.
- [19] 王瀚, 周海峰, 刘天熙, 等. Matlab/Simulink 仿真在电力系统短路故障中的应用[J]. 应用能源技术, 2020(7): 1-8.