

闭式布雷顿循环发电系统热力过程建模及其参数影响研究*

马同玲^{1,2}, 张扬军¹, 王正², 赵伟², 王力国²

(1. 清华大学 车辆与运载学院, 北京 100084;
2. 北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘要: 针对闭式布雷顿循环发电系统热力循环过程及其参数影响, 开展系统的热力过程参数建模研究, 建立系统发电功率、比功率和效率的计算模型; 在此基础上, 研究闭式布雷顿循环发电系统比功率和效率随涡轮入口总温及效率、压气机入口总温、压气机压比及效率、累积总压恢复系数等的变化规律, 考虑参数灵敏度及其优化潜力, 提出可用灵敏度并对系统的比功率和效率进行灵敏度分析。研究表明, 闭式布雷顿循环发电系统的比功率和效率随涡轮入口总温及效率、压气机压比及效率、系统累积总压恢复系数等参数的增大而增高, 随压气机入口总温的增大而减小。在压气机入口总温、压比与效率、涡轮入口总温及效率、累积总压恢复系数等主要热力参数中, 系统比功率灵敏度最高的参数为涡轮效率, 系统效率灵敏度最高的参数为压气机压比。考虑参数的实际优化潜力, 在循环工质一定的条件下, 系统比功率可用灵敏度最高的参数为涡轮入口总温, 系统效率可用灵敏度最高的参数为压气机压比。

关键词: 闭式布雷顿循环; 发电系统; 热力过程; 参数建模; 可用灵敏度分析

中图分类号: V439 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 07-210782-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210782

Thermodynamic Process Modeling and Parameter Influence of Closed Brayton Cycle Power Generation System

MA Tong-ling^{1,2}, ZHANG Yang-jun¹, WANG Zheng², ZHAO Wei², WANG Li-guo²

(1. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: For the thermodynamic process and parameter influence of closed Brayton cycle power generation system, the system thermodynamic process parameters modeling is studied, and the mathematical models of system power generating capacity, specific power and efficiency are developed. Then, the influence rules that the parameters including total turbine inlet temperature, turbine efficiency, total compressor inlet temperature, pressure ratio, compressor efficiency and total pressure recovery coefficient affect the specific power and efficiency of closed Brayton cycle power generation system, are studied. Taking the sensitivity and optimization potential of parameters into account, the available sensitivity is proposed, and the sensitivity analysis of specific power and efficiency of closed Brayton cycle power generation system is done. The results show that the power generating ca-

* 收稿日期: 2021-11-07; 修订日期: 2022-04-07。

作者简介: 马同玲, 研究员, 研究领域为空天新型能源涡轮动力。

通讯作者: 张扬军, 博士, 教授, 研究领域为涡轮混合动力。

引用格式: 马同玲, 张扬军, 王正, 等. 闭式布雷顿循环发电系统热力过程建模及其参数影响研究[J]. 推进技术, 2022, 43(7): 210782. (MA Tong-ling, ZHANG Yang-jun, WANG Zheng, et al. Thermodynamic Process Modeling and Parameter Influence of Closed Brayton Cycle Power Generation System[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(7): 210782.)

capacity and efficiency of closed Brayton cycle power generation system increase as the increase of total turbine inlet temperature, turbine efficiency, pressure ratio, compressor efficiency and total pressure recovery coefficient, and decreases as the increase of total compressor inlet temperature. Among the parameters including the total inlet temperature, pressure ratio and compressor efficiency of compressor, the total inlet temperature and efficiency of turbine, the total pressure recovery coefficient, and so on, the turbine efficiency is the most sensitive parameter for system specific power, and the pressure ratio is the most sensitive parameter for system efficiency. Considering the actual optimization potential, the total turbine inlet temperature is the most sensitive and available parameter for system specific power when the cycle fluid is determined, and the pressure ratio is the most sensitive and available parameter for system efficiency.

Key words: Closed Brayton cycle; Power generation system; Thermodynamic process; Parameter modeling; Available sensitivity analysis

1 引言

闭式布雷顿循环发电作为一种动态热电转换方式,具有组成结构简单、热电转换效率高、功率调节范围宽等特点,在工作过程中与外界只进行能量交换而无物质交换。闭式布雷顿循环发电系统主要由热源、涡轮、压气机、发电机、散热器等部件组成,以特殊气体为工质的闭式布雷顿循环发电系统目前被认为是空间大功率热电转换最可行的技术方案^[1-7],同时以二氧化碳为工质的超临界闭式布雷顿循环系统被应用于第四代核电站动力循环、太阳能集热发电等^[8],应用前景广阔。

围绕闭式布雷顿循环系统的热力参数与性能优化,国内外学者从不同角度开展了相关研究。杨谢等^[3]针对空间核反应堆闭式布雷顿循环系统工质选取,研究了氦氩混合气体物性随摩尔质量、温度和压力的变化,分析了氦氩混合气体物性变化对空间布雷顿循环的绝热系数、对流换热性能、阻力特性等的影响。李智等^[6]针对空间反应堆布雷顿循环热力学优化问题,考虑体积、重量和空间运行环境限制,提出了循环比功优化模式,对比分析了比效率优化模式和比功优化模式的循环总体参数和节点参数,指出在空间布雷顿循环发电系统设计中,比功优化模式在减小系统体积、质量方面具有优势,但是具体设计参数的取值需结合工程实际要求。郭嘉琪等^[9]运用热力学定律分析了分流、预压缩再热以及改进再压缩超临界二氧化碳布雷顿热力循环,研究了压缩机和涡轮入口参数对布雷顿循环热力学性能的影响,提出了以二氧化碳为主的混合工质布雷顿循环,进一步研究了气体种类及加入量对混合工质布雷顿循环热力学性能的影响,指出在二氧化碳质量分数大于50%的情况下,加入氦气和氩气可以提高循环热

效率。陈林根等^[10]针对闭式布雷顿循环在航空航天电源系统中的应用,研究了恒温热源不可逆闭式布雷顿循环系统的性能,推导出了最佳功率和效率之间的关系。马喆等^[11]针对高速飞行器热防护问题,提出了一种利用气动热发电的布雷顿循环热电转化技术,并结合高速飞行器飞行工况,计算得到了热电转换系统发电效率与功率,研究了飞行马赫数、关键部件效率、压比和循环工质对系统性能的影响,指出合理选择工质可提高布雷顿热电转化系统的发电功率与效率。郭凯伦等^[12]针对兆瓦级核电推进系统的动态布雷顿热电转换方式,基于氦气、氮气、二氧化碳和氩气四种工质及它们以不同比例混合的工质的热物性,进行了相关特性分析与对比研究。杨静等^[13]对闭式 Brayton 循环太阳能热动力系统组成、发电原理及循环工质选择等进行了论述,指出太阳能热动力系统具有效率高、质量轻、费用少、寿命长等特点。从现有文献来看,闭式布雷顿循环发电系统工质主要有二氧化碳及其混合气体、氦氩混合气体等^[14-15],应用背景包括空间热电转换、高速飞行器热防护等。

本文针对闭式布雷顿循环发电系统热力过程及其参数影响问题,分析闭式布雷顿循环发电系统的主要组成及其热力过程,建立闭式布雷顿循环热力发电系统的热力循环数学模型,研究系统比功率与效率随主要参数的变化规律。

2 闭式布雷顿循环发电系统热力循环过程

闭式布雷顿循环发电系统通常主要由高温加热器、涡轮、压气机、高速电机、冷却器、回热器等部件组成,工质在由压气机、回热器冷侧、高温加热器、涡轮、回热器热侧和冷却器所组成的闭式回路中有序循环流动,如图1所示。

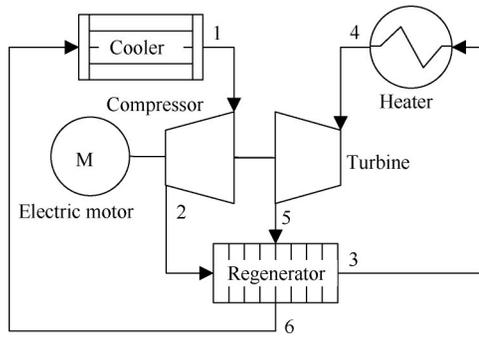


Fig. 1 Schematic diagram of closed Brayton cycle power generation system

结合图1所示闭式布雷顿循环发电系统组成示意图可知,其热力循环过程为:工质流过加热器被加热后,进入涡轮膨胀做功,接着进入回热器热侧通道与回热器冷侧通道内工质进行热量交换以降低温度,然后进入冷却器进一步降低温度,被冷却后的工质经压气机压缩后,进入回热器冷侧通道被加热,最后进入加热器进一步加热,加热后的工质进入涡轮膨胀做功,如此形成一个完整的闭式热力循环,实现热能向机械功的转变。

图2和图3所示分别为闭式布雷顿循环发电系统热力过程的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图。过程1→2表示工质流经压气机时被增压,过程2→3表示工质流经回热器冷侧通道时被加热,过程3→4表示工质在加热器中吸热,过程4→5表示工质流经涡轮膨胀做功,过程5→6表示工质流经回热器热侧通道时被冷却,过程6→1表示工质在冷却器中进行放热。

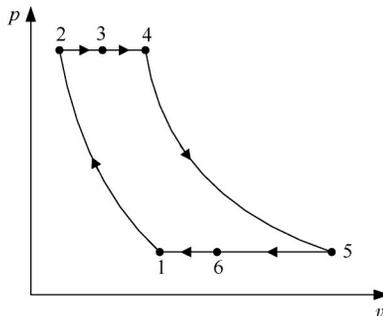


Fig. 2 Thermodynamic process $p-v$ diagram of closed Brayton cycle power generation system

在闭式布雷顿循环发电系统中,通过工质的循环流动实现热能向机械功的转变。涡轮回收的机械功中扣除压气机耗功和各类损失后,剩余的机械功用于驱动发电机工作,将机械功转变为电能。

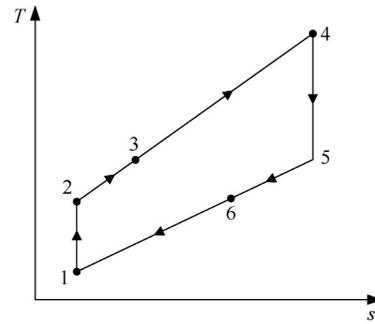


Fig. 3 Thermodynamic process $T-s$ diagram of closed Brayton cycle power generation system

3 闭式布雷顿循环发电系统的热力参数建模

针对图1所示闭式布雷顿循环发电系统,建立该系统的热力参数计算模型。设加热器出口总温为 T_H^* ,总压为 p_H^* ,冷却器出口总温为 T_C^* ,压气机压比为 π_c ,效率为 η_c ,进口总温和总压分别为 T_1^* 和 p_1^* ,回热器冷侧回热率为 ϵ_{RC} ,冷侧通道及其连接管路总压恢复系数为 σ_{RC} ,加热器及其连接管路总压恢复系数为 σ_H ,涡轮膨胀比为 π_T ,效率为 η_T ,回热器热侧回热率为 ϵ_{RH} ,热侧通道及其连接管路总压恢复系数为 σ_{RH} ,冷却器及其连接管路总压恢复系数为 σ_C ,流量为 m ,机械效率为 η_M ,发电机效率为 η_E ,工质比定压热容为 c_p ,比热比为 k 。结合图2所示热力过程,各参数计算如下:

压气机出口总温 T_2^* 和总压 p_2^* 可分别表示为

$$T_2^* = T_1^* \left(1 + \frac{1}{\eta_c} \cdot \pi_c^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_c} \right) \quad (1)$$

$$p_2^* = p_1^* \cdot \pi_c \quad (2)$$

回热器冷侧通道出口总温 T_3^* 和总压 p_3^* 可以分别表示为

$$T_3^* = T_2^* + (T_5^* - T_2^*) \epsilon_{RC} \quad (3)$$

$$p_3^* = p_2^* \cdot \sigma_{RC} \quad (4)$$

工质经过加热器后的出口总温 T_4^* 和总压 p_4^* 可以分别表示为

$$T_4^* = T_H^* \quad (5)$$

$$p_4^* = p_3^* \cdot \sigma_H \quad (6)$$

涡轮出口总温 T_5^* 和总压 p_5^* 可以分别表示为

$$T_5^* = T_4^* - T_4^* \cdot \eta_T + T_4^* \cdot \eta_T \left(\pi_T^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) \quad (7)$$

$$p_5^* = \frac{p_4^*}{\pi_T} \quad (8)$$

回热器热侧的出口总温 T_6^* 和总压 p_6^* 可分别表示为

$$T_6^* = T_5^* - (T_5^* - T_2^*)\varepsilon_{RH} \quad (9)$$

$$p_6^* = p_5^* \cdot \sigma_{RH} \quad (10)$$

工质经过冷却器后的出口总温 T_1^* 和总压 p_1^* 可分别表示为

$$T_1^* = T_2^* \quad (11)$$

$$p_1^* = p_6^* \cdot \sigma_C \quad (12)$$

系统发电功率 W_E 可以表示为

$$\mu_s = \frac{\left[T_4^* \cdot \eta_T \left(1 - \pi_T^{\frac{1-k}{k}} \right) \eta_M - \frac{T_1^*}{\eta_C} \left(\pi_C^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \eta_E}{\left\{ T_4^* - T_1^* \left(1 + \frac{1}{\eta_C} \cdot \pi_C^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_C} \right) - \left[T_4^* + T_4^* \cdot \eta_T \left(\pi_T^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) - T_1^* \left(1 + \frac{1}{\eta_C} \cdot \pi_C^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_C} \right) \right] \varepsilon_{RC} \right\}} \quad (15)$$

由式(8)可知,膨胀比 π_T 可表示为

$$\pi_T = (\sigma_{RH} \cdot \sigma_C \cdot \sigma_{RC} \cdot \sigma_H) \cdot \pi_C \quad (16)$$

令系统累积总压恢复系数 σ 为

$$\sigma = \sigma_{RH} \cdot \sigma_C \cdot \sigma_{RC} \cdot \sigma_H \quad (17)$$

式(16)可以表示为

$$\eta_s = \frac{\left[T_4^* \left(1 - (\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-k}{k}} \right) \times \eta_T \eta_M - \frac{T_1^*}{\eta_C} \left(\pi_C^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \eta_E}{\left\{ T_4^* - T_1^* \left(1 + \frac{1}{\eta_C} \cdot \pi_C^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_C} \right) - \left[T_4^* + \left((\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) \times T_4^* \eta_T - T_1^* \left(1 + \frac{1}{\eta_C} \cdot \pi_C^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_C} \right) \right] \varepsilon_{RC} \right\}} \quad (20)$$

系统比功率 w_E 可表示为

$$w_E = \left[T_4^* \left(1 - (\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-k}{k}} \right) \cdot \eta_T \eta_M - \frac{T_1^*}{\eta_C} \left(\pi_C^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] c_p \eta_E \quad (21)$$

从式(19)~式(21)可看出,闭式布雷顿循环发电系统发电功率、效率和比功率同涡轮入口总温、涡轮效率、压气机入口总温、压气机压比与效率、系统机械效率、发电机效率 η_E ,工质定压热容与比热比以及累积总压恢复系数有关;此外,系统发电功率还同循环工质的质量流量有关,系统的发电效率还同回热器冷侧回热度有关。

$$W_E = c_p m \mu_E \left[T_4^* \cdot \eta_T \left(1 - \pi_T^{\frac{1-k}{k}} \right) \eta_M - \frac{T_1^*}{\eta_C} \left(\pi_C^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \quad (13)$$

系统吸热量 Q_H 为

$$Q_H = mc_p \left\{ T_4^* - T_1^* \left(1 + \frac{1}{\eta_C} \cdot \pi_C^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_C} \right) - \left[T_4^* + T_4^* \cdot \eta_T \left(\pi_T^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) - T_1^* \left(1 + \frac{1}{\eta_C} \cdot \pi_C^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_C} \right) \right] \varepsilon_{RC} \right\} \quad (14)$$

系统效率 μ_s 可以表示为

$$\pi_T = \sigma \cdot \pi_C \quad (18)$$

进一步,系统发电功率 W_E 和效率 η_s 可表示为

$$W_E = \left[T_4^* \left(1 - (\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-k}{k}} \right) \cdot \eta_T \eta_M - \frac{T_1^*}{\eta_C} \left(\pi_C^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] c_p m \eta_E \quad (19)$$

4 闭式布雷顿循环发电系统参数影响研究

运用式(20)和式(21)所示的闭式布雷顿循环发电系统热力参数计算模型,研究某闭式布雷顿循环发电系统比功率和效率随涡轮入口总温及效率、压气机入口总温、压气机压比及效率、累积总压恢复系数等的变化规律。

当涡轮入口总温 T_4^* 在设计点的 75%~125% 内变化时,闭式布雷顿发电系统的比功率和效率相对于设计点值的百分比变化如图 4 所示。从图 4 中可以看出,随着涡轮入口总温的增加,系统比功率在增加,效率随之增大。

当涡轮效率 η_T 在设计点的 85%~105% 内变化

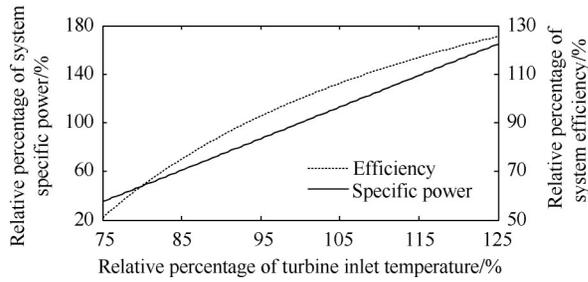


Fig. 4 Specific power and efficiency of system vs. turbine inlet temperature

时,闭式布雷顿发电系统的比功率和效率相对于设计点值的百分比变化如图 5 所示。从图 5 中可以看出,随着涡轮效率的增加,系统比功率和效率也随之增大。

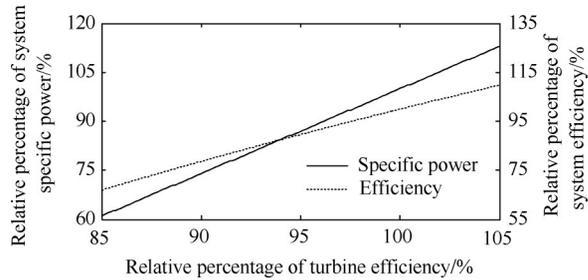


Fig. 5 Specific power and efficiency of system vs. turbine efficiency

当压气机压比 π_c 在设计点的 70% ~ 130% 内变化时,闭式布雷顿发电系统的比功率和效率相对于设计点值的百分比变化如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着压气机压比的增大,系统的比功率在增大,效率也随之增加。

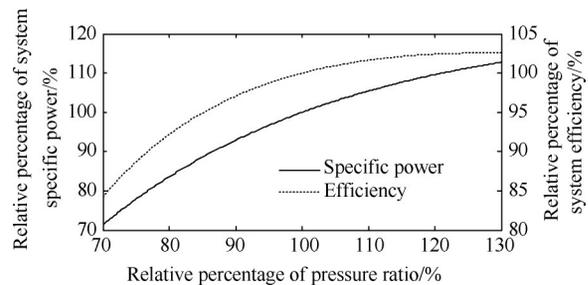


Fig. 6 Specific power and efficiency of system vs. the pressure ratio of compressor

当压气机效率 η_c 在设计点的 88% ~ 102% 内变化时,闭式布雷顿发电系统的比功率和效率相对于设计点值的百分比变化如图 7 所示。从图 7 可看出,系统的发电功率和效率随着压气机效率的增加而增大。

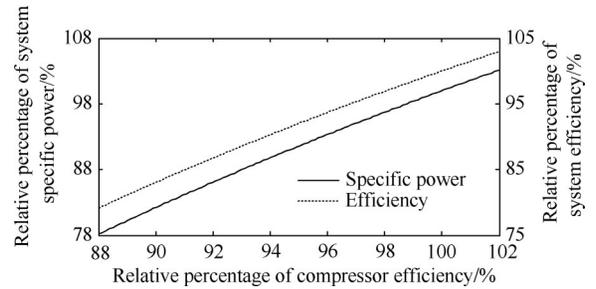


Fig. 7 Specific power and efficiency of system vs. compressor efficiency

当压气机入口总温 T_1^* 在设计点的 90%~130% 内变化时,闭式布雷顿发电系统的比功率和效率相对于设计点值的百分比变化如图 8 所示。从图 8 可看出,系统的发电功率和效率随压气机入口总温的增加而降低。

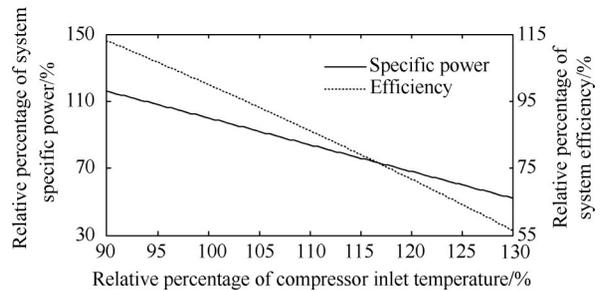


Fig. 8 Specific power and efficiency of system vs. compressor inlet temperature

当系统累积总压恢复系数在设计点的 80% ~ 110% 内变化时,闭式布雷顿发电系统的比功率和效率相对于设计点值的百分比变化如图 9 所示。

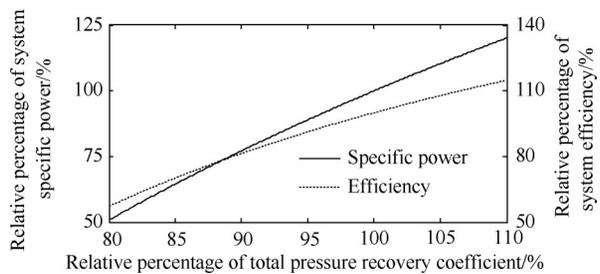


Fig. 9 Specific power and efficiency of system vs. pressure recovery coefficient

从图 9 可看出,系统比功率和效率随系统累积总压恢复系数的增加而增大。

为进一步对比研究压气机入口总温、压比及效率、涡轮入口总温及效率、系统累积总压恢复系数等参数对系统比功率和效率的影响,对闭式布雷顿循环发电系统主要影响参数进行灵敏度分析。

将式(21)分别对压气机入口总温 T_1^* 、压比 π_c 和效率 η_c ，涡轮入口总温 T_4^* 和效率 η_T 以及系统累积总压恢复系数 σ 求偏导数，可得闭式布雷顿循环发电系统比功率灵敏度计算模型，如式(22)~式(27)所示。将某型闭式布雷顿循环发电系统参数设计值代入式(22)~式(27)，可得到比功率对压气机入口总温、压比及效率、涡轮入口总温及效率、系统累积总压恢复系数等的灵敏度值，如图 10 所示。

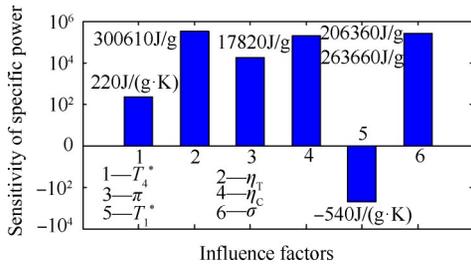


Fig. 10 Sensitivity of specific power of Brayton cycle power system

$$\frac{\partial w_E}{\partial T_1^*} = -\frac{1}{\eta_c} c_p \eta_E \left(\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (22)$$

$$\frac{\partial w_E}{\partial \pi_c} = \frac{k-1}{k} T_4^* \sigma \eta_T \eta_M (\sigma \cdot \pi_c)^{\frac{1-2k}{k}} \times c_p \eta_E - \frac{k-1}{k} c_p \eta_E \frac{T_1^*}{\eta_c} \pi_c^{-\frac{1}{k}} \quad (23)$$

$$\frac{\partial w_E}{\partial \eta_c} = \frac{T_4^*}{\eta_c^2} \left(\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) c_p \eta_E \quad (24)$$

$$\frac{\partial w_E}{\partial T_4^*} = \eta_T \eta_M c_p \eta_E \left[1 - (\sigma \cdot \pi_c)^{\frac{1-k}{k}} \right] \quad (25)$$

$$\frac{\partial w_E}{\partial \eta_T} = T_4^* \eta_M c_p \eta_E \left[1 - (\sigma \cdot \pi_c)^{\frac{1-k}{k}} \right] \quad (26)$$

$$\frac{\partial w_E}{\partial \sigma} = T_4^* \eta_T \eta_M c_p \eta_E \pi_c^{\frac{k-1}{k}} (\sigma \cdot \pi_c)^{\frac{1-2k}{k}} \quad (27)$$

从图 10 可以看出，对闭式布雷顿循环发电系统比功率影响灵敏度最高的参数为涡轮效率，然后依次为：累积总压恢复系数、压气机效率、压气机压比、压气机入口总温和涡轮入口总温。

将式(20)分别对压气机入口总温 T_1^* 、压比 π_c 和效率 η_c ，涡轮入口总温 T_4^* 和效率 η_T 以及系统累积总压恢复系数 σ 求偏导数，可得闭式布雷顿循环发电系统的效率灵敏度计算模型，如式(28)~式

(33)所示。将某型闭式布雷顿循环发电系统参数设计值代入式(29)~式(34)，可得到效率对压气机入口总温、压比及效率、涡轮入口总温及效率、系统累积总压恢复系数等参数的灵敏度值，如图 11 所示。

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial T_1^*} = \eta_E \eta_T \eta_M \frac{1}{\eta_c} \left(1 - \pi_c^{\frac{k-1}{k}} \right) Q^{-1} - p Q^{-2} \left(1 + \frac{1}{\eta_c} \cdot \pi_c^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_c} \right) (1 - \varepsilon_{RC}) \quad (28)$$

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial \pi_c} = \left(\frac{k-1}{k} T_4^* \sigma^{\frac{1-k}{k}} \eta_T \eta_M \pi_c^{\frac{1-2k}{k}} - \frac{k-1}{k} \frac{T_1^*}{\eta_c} \pi_c^{-\frac{1}{k}} \right) \cdot \eta_E Q^{-1} - p Q^{-2} \frac{k-1}{k} \left(\frac{T_1^*}{\eta_c} \pi_c^{-\frac{1}{k}} \varepsilon_{RC} - \frac{T_1^*}{\eta_c} \pi_c^{-\frac{1}{k}} + T_4^* \eta_T \sigma^{\frac{1-k}{k}} \cdot \pi_c^{\frac{1-2k}{k}} \varepsilon_{RC} \right) \quad (29)$$

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial \eta_c} = \eta_E \eta_T \eta_M \left(T_1^* \pi_c^{\frac{k-1}{k}} \eta_c^{-2} - \eta_c^{-2} T_1^* \right) Q^{-1} - p Q^{-2} T_1^* \frac{1}{\eta_c^2} \left(\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) (1 - \varepsilon_{RC}) \quad (30)$$

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial T_4^*} = \eta_E \eta_T \eta_M \left(1 - (\sigma \cdot \pi_c)^{\frac{1-k}{k}} \right) Q^{-1} - Q^{-2} p \left\{ 1 - \left[1 + \left((\sigma \cdot \pi_c)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) \right] \eta_T \varepsilon_{RC} \right\} \quad (31)$$

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial \eta_T} = \eta_E T_4^* \eta_M \left(1 - (\sigma \cdot \pi_c)^{\frac{1-k}{k}} \right) Q^{-1} - Q^{-2} p \left\{ - \left[\left((\sigma \cdot \pi_c)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) \right] T_4^* \varepsilon_{RC} \right\} \quad (32)$$

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial \sigma} = \eta_E \eta_T \eta_M T_4^* \frac{k-1}{k} \pi_c^{\frac{1-k}{k}} \sigma^{\frac{1-2k}{k}} Q^{-1} - p Q^{-2} \frac{k-1}{k} T_4^* \eta_T \varepsilon_{RC} \pi_c^{\frac{1-k}{k}} \sigma^{\frac{1-2k}{k}} \quad (33)$$

式(28)~式(33)中，

$$p = \left[T_4^* \left(1 - (\sigma \cdot \pi_c)^{\frac{1-k}{k}} \right) \eta_T \eta_M - \frac{T_1^*}{\eta_c} \left(\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \eta_E \quad (34)$$

$$Q = T_4^* - T_1^* \left(1 + \frac{1}{\eta_c} \cdot \pi_c^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_c} \right) - \left[T_4^* + T_4^* \times \eta_T \left(\pi_T^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) - T_1^* \left(1 + \frac{1}{\eta_c} \cdot \pi_c^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_c} \right) \right] \varepsilon_{RC} \quad (35)$$

从图 11 可以看出，对闭式布雷顿循环发电系统

效率影响灵敏度最高的参数为压气机压比,然后依次为:涡轮效率、压气机效率、系统累积总压恢复系数、压气机入口总温和涡轮入口总温。

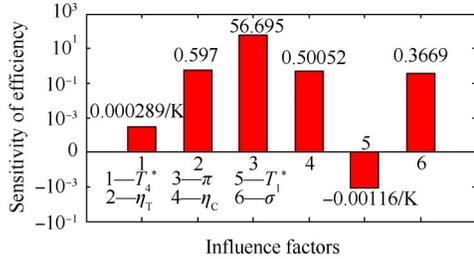


Fig. 11 Sensitivity of efficiency of Brayton cycle power system

5 闭式布雷顿循环发电系统可用灵敏度研究

为更好地指导闭式布雷顿循环发电系统的性能优化与设计参数选取,考虑系统中不同参数实际取值范围,提出并采用闭式布雷顿循环发电系统参数可用灵敏度作为对比依据。

可用灵敏度定义为:影响系统输出的参数在设计点的灵敏度值同系统期望该参数相对于当前设计点的单向实际可取值范围大小的乘积,称为该参数在当前设计点的可用灵敏度。可用灵敏度不仅能够体现系统对某参数发生单位变化时的响应程度,而且考虑了该参数的优化潜力。按照可用灵敏度的定义,若系统响应函数为 $y = f(x_1, \dots, x_n)$, 变量 x_i 的可用灵敏度表示为

$$\lambda(x_i) = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot |x_{i0} - x_i| \quad (36)$$

式中 x_{i0} 为系统所期望变量 x_i 的单向实际可取最大变化范围的边界值。

根据可用灵敏度的定义,闭式布雷顿循环发电系统比功率对于压气机入口总温、压比及效率、涡轮入口总温及效率和系统累积总压恢复系数的可用灵敏度可以分别表示为

$$\lambda_{w_e}(T_1^*) = -\frac{1}{\eta_C} |T_1^* - T_{1L}| c_p \eta_E \left(\pi_C^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (37)$$

$$\lambda_{w_e}(\pi_C) = \left[\frac{k-1}{k} T_4^* \sigma \eta_T \eta_M (\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-2k}{k}} c_p \eta_E - \frac{k-1}{k} c_p \eta_E \frac{T_1^*}{\eta_C} \pi_C^{-\frac{1}{k}} \right] |\pi_C - \pi_{CM}| \quad (38)$$

$$\lambda_{w_e}(\eta_C) = |\eta_{CM} - \eta_C| \frac{T_4^*}{\eta_C^2} \left(\pi_C^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) c_p \eta_E \quad (39)$$

$$\lambda_{w_e}(T_4^*) = |T_{4M}^* - T_4^*| \eta_T \eta_M c_p \eta_E \left[1 - (\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-k}{k}} \right] \quad (40)$$

$$\lambda_{w_e}(\eta_T) = |\eta_{TM} - \eta_T| T_4^* \eta_M c_p \eta_E \left[1 - (\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-k}{k}} \right] \quad (41)$$

$$\lambda_{w_e}(\sigma) = |\sigma - \sigma_L| T_4^* \eta_T \eta_M c_p \eta_E \pi_C \frac{k-1}{k} (\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-2k}{k}} \quad (42)$$

将某型闭式布雷顿循环发电系统的参数设计值及其表1中所示的该系统部分参数期望的单向可取最大变化范围代入式(37)~式(42),可得到系统比功率对压气机入口总温、压比及效率、涡轮入口总温及效率、系统累积总压恢复系数等参数的可用灵敏度值,如图12所示。

从图12中可以看出,兼顾系统不同参数的可优化潜力后,对系统比功率影响最大的参数为涡轮入口总温,然后依次为:压气机入口总温、压气机压比、累积总压恢复系数和压气机效率。

Table 1 Maximum one-way expected variation range of system parameters

No.	Parameters	Maximum one-way variation range (Ratio of maximum variation and design value)
1	Compressor inlet temperature	-0.034
2	Pressure ratio	0.286
3	Compressor efficiency	0.0256
4	Turbine inlet temperature	0.167
5	Turbine efficiency	0.023
6	Total pressure recovery coefficient	0.021

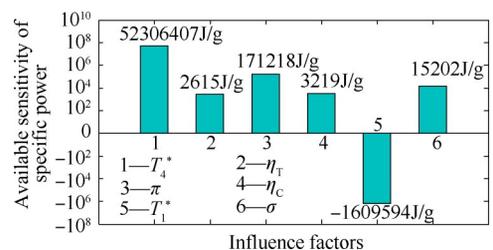


Fig. 12 Available sensitivity of specific power of Brayton cycle power system

系统效率对压气机入口总温、压比及效率、涡轮入口总温及效率和系统累积总压恢复系数的可用灵敏度可以分别表示为

$$\lambda_{\eta_s}(T_1^*) = |T_1^* - T_{1L}^*| \eta_E \eta_T \eta_M \frac{1}{\mu_C} \left(1 - \pi_C^{\frac{k-1}{k}}\right) Q^{-1} - pQ^{-2} \left(1 + \frac{1}{\eta_C} \cdot \pi_C^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_C}\right) (1 - \varepsilon_{RC}) \quad (43)$$

$$\lambda_{\mu_s}(\pi_C) = \left[\left(\frac{k-1}{k} T_4^* \sigma^{\frac{1-k}{k}} \eta_T \eta_M \pi_C^{\frac{1-2k}{k}} - \frac{k-1}{k} \frac{T_1^*}{\eta_C} \pi_C^{-\frac{1}{k}} \right) \eta_E Q^{-1} - pQ^{-2} \frac{k-1}{k} \left(\frac{T_1^*}{\eta_C} \pi_C^{-\frac{1}{k}} \varepsilon_{RC} - \frac{T_1^*}{\eta_C} \pi_C^{-\frac{1}{k}} + T_4^* \eta_T \sigma^{\frac{1-k}{k}} \cdot \pi_C^{\frac{1-2k}{k}} \varepsilon_{RC} \right) \right] |\pi_C - \pi_{CM}| \quad (44)$$

$$\lambda_{\eta_s}(\eta_C) = \left[\eta_E \eta_T \eta_M \left(T_1^* \pi_C^{\frac{k-1}{k}} \eta_C^{-2} - \eta_C^{-2} T_1^* \right) Q^{-1} - pQ^{-2} T_1^* \frac{1}{\eta_C^2} \left(\pi_C^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) (1 - \varepsilon_{RC}) \right] |\eta_{CM} - \eta_C| \quad (45)$$

$$\lambda_{\eta_s}(T_4^*) = |T_{4M}^* - T_4^*| \left\{ \eta_E \eta_T \eta_M \left(1 - (\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-k}{k}} \right) Q^{-1} - Q^{-2} p \left\{ 1 - \left[1 + \left((\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) \eta_T \varepsilon_{RC} \right] \right\} \right\} \quad (46)$$

$$\lambda_{\eta_s}(\eta_T) = |\eta_{TM} - \eta_T| \left\{ \eta_E T_4^* \eta_M \left(1 - (\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-k}{k}} \right) Q^{-1} - Q^{-2} p \left\{ - \left[\left((\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) T_4^* \varepsilon_{RC} \right] \right\} \right\} \quad (47)$$

$$\lambda_{\eta_s}(\sigma) = \left(\eta_E \eta_T \eta_M T_4^* \frac{k-1}{k} \pi_C^{\frac{1-k}{k}} \sigma^{\frac{1-2k}{k}} Q^{-1} - pQ^{-2} \frac{k-1}{k} T_4^* \eta_T \varepsilon_{RC} \pi_C^{\frac{1-k}{k}} \sigma^{\frac{1-2k}{k}} \right) |\sigma - \sigma_L| \quad (48)$$

式(43) ~ 式(48)中,

$$p = \left[T_4^* \left(1 - (\sigma \cdot \pi_C)^{\frac{1-k}{k}} \right) \eta_T \eta_M - \frac{T_1^*}{\eta_C} \left(\pi_C^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \eta_E \quad (49)$$

$$Q = T_4^* - T_1^* \left(1 + \frac{1}{\eta_C} \cdot \pi_C^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_C} \right) - \left[T_4^* + T_4^* \times \eta_T \left(\pi_T^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) - T_1^* \left(1 + \frac{1}{\eta_C} \cdot \pi_C^{\frac{k-1}{k}} - \frac{1}{\eta_C} \right) \right] \varepsilon_{RC} \quad (50)$$

将某型闭式布雷顿循环发电系统的参数设计值及其表 1 中所示的该系统部分参数期望的单向可取最大变化范围代入式(43) ~ 式(48), 可得到系统效

率对压气机入口总温、压比及效率、涡轮入口总温及效率、系统累积总压恢复系数等参数的可用灵敏度值, 如图 13 所示。

从图 13 中可以看出, 兼顾系统不同参数的可优化潜力后, 对系统效率影响最大的参数为压气机压比, 然后依次为: 涡轮的入口总温、压气机入口总温、累积总压恢复系数、压气机效率和涡轮效率。

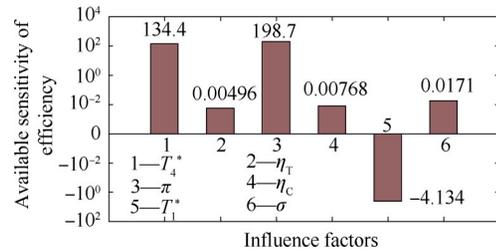


Fig. 13 Available sensitivity of efficiency of Brayton cycle power system

6 结 论

本文通过研究, 得到如下结论:

(1) 闭式布雷顿循环发电系统的比功率和效率随涡轮入口总温及效率、压气机压比及效率、系统累积总压恢复系数等参数的增大而增高, 随压气机入口总温的增大而减小。

(2) 在压气机入口总温、压比与效率、涡轮入口总温及效率、累积总压恢复系数等主要热力参数中, 系统比功率灵敏度最高的参数为涡轮效率, 系统效率灵敏度最高的参数为压气机压比。

(3) 考虑参数的优化潜力, 在循环工质一定的条件下, 系统比功率可用灵敏度最高的参数为涡轮入口总温, 系统效率可用灵敏度最高的参数为压气机压比, 该结论更加具有实际指导意义。

在后续研究中, 将针对闭式布雷顿循环发电系统的比功率与效率变化规律, 依托搭建的闭式循环试验系统开展试验验证。

参考文献

[1] 李 永, 周 成, 吕 征, 等. 大功率空间核电推进技术研究进展[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 12-27. (LI Yong, ZHOU Cheng, LYU Zheng, et al. Progress on High Power Space Nuclear Electric Propulsion Technology Development[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(1): 12-27.)

[2] EL-GENK M S. Deployment History and Design Considerations for Space Reactor Power Systems[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64: 833-849.

- [3] 杨 谢, 石 磊. 氦—氩混合气体物性对布雷顿循环影响分析[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(8): 1407-1414.
- [4] Mason L S. A Comparison of Fission Power System Options for Lunar and Mars Surface Applications[C]. *Maryland: AIP Conference Proceedings*, 2006.
- [5] Tournier J, EL-GENK M S, Gallo B. Best Estimates of Binary Gas Mixtures Properties for Closed Brayton Cycle Space Applications [C]. *San Diego: 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC)*, 2006.
- [6] 李 智, 杨小勇, 王 捷, 等. 空间反应堆布雷顿循环热力学优化分析[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(7): 1173-1180.
- [7] 杨启法, 卢浩琳. 空间核反应堆电源研究和应用[J]. 航天器工程, 1997, 12(4): 11-14.
- [8] 曹 宇, 王治红, 马 宁, 等. 超临界二氧化碳布雷顿/有机朗肯循环联合系统的热力学特性[J]. 热能动力工程, 2020, 35(4): 9-15.
- [9] 郭嘉琪, 王 坤, 朱含慧, 等. 超临界 CO₂及其混合工质布雷顿循环热力学分析[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(4): 695-702.
- [10] 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 航空航天用闭式布雷顿循环的热力学优化[J]. 推进技术, 1995, 16(2): 46-49. (CHEN Lin-gen, SUN Feng-ru, CHEN Wen-zhen. A Thermodynamic Optimization of Closed-Cycle Brayton Plants for Aerospace Power System [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1995, 16(2): 46-49.)
- [11] 马 喆, 张兴娟, 杨春信. 高超声速飞行器热防护的布雷顿热电转化技术[J]. 战术导弹技术, 2014(4): 20-25.
- [12] 郭凯伦, 王成龙, 秋穗正, 等. 兆瓦级核电推进系统布雷顿循环热电转换特性分析[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(1): 16-23.
- [13] 杨 静, 刘 石, 陈焕倬, 等. 空间站闭式 Brayton 循环及我国在相关方面的研究[J]. 能源技术, 2002, 23(2): 51-54.
- [14] 王兵兵, 乔加飞. 不同超临界 CO₂布雷顿循环性能的对比研究[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(1): 4-8.
- [15] 曹 挺, 黄伟光, 张靖焯. 基于 He-N₂混合工质的闭式 Brayton 循环系统及设备的优化设计[J]. 动力工程学报, 2019, 39(2): 155-162.

(编辑:梅 瑛)