

基于 Python-AMESim 的机载蒸发循环系统仿真与特性分析

陈 闯¹, 朱麟海¹, 王选志¹, 周子涵¹, 单士龙², 王友银²

(1. 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035;

2. 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: 为研究机载蒸发循环制冷系统关键部件耦合特性及交界面参数对系统性能的影响规律, 基于 Python-AMESim 联合仿真平台搭建了机载蒸发循环系统模型, 并开展了系统开环特性研究。在额定工况下, 通过改变压缩机转速、膨胀阀开度、低温聚 α 烯烃(Polyalphaolefin, PAO)参数以及高温 PAO 参数, 分析了各参数对系统蒸发压力和换热量等关键参数的影响规律。结果表明: 压缩机转速升高导致制冷剂流量增加、蒸发压力下降和制冷系数减小; 膨胀阀开度在 40% 时系统换热量达到峰值, 超过 50% 后出现蒸发不完全现象; 低温 PAO 流量在达到 150 L/min 后对系统的影响趋于稳定, 而入口温度升高对系统性能提升明显; 高温 PAO 的入口温度对系统参数影响显著, 温度升高导致冷凝压力激增、制冷系数下降。所建立的联合仿真模型融合了 AMESim 在物理机理建模上的精度优势与 Python 在算法集成与交互设计上的灵活性, 获得了在所选部件参数和工况下的系统特性和影响规律, 为机载热管理系统的优化设计与控制策略制定提供理论依据。

关键词: 机载蒸发循环; 动态仿真; AMESim; Python; 开环特性分析

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.11.009

[引用本文格式] 陈 闯, 朱麟海, 王选志, 等. 基于 Python-AMESim 的机载蒸发循环系统仿真与特性分析[J]. 热能动力工程, 2025, 40(11): 75-83. CHEN Chuang, ZHU Linhai, WANG Xuanchi, et al. Python-AMESim-based simulation and characteristic analysis of airborne evaporation cycle system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(11): 75-83.

Python-AMESim-based Simulation and Characteristic Analysis of Airborne Evaporation Cycle System

CHEN Chuang¹, ZHU Linhai¹, WANG Xuanchi¹, ZHOU Zihan¹, SHAN Shilong², WANG Youyin²

(1. AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang, China, Post Code: 110035;

2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: To investigate the coupling characteristics of key components in airborne evaporation cycle refrigeration systems and the influence of interface parameters on system performance, a model of airborne evaporation cycle systems was developed based on an Python-AMESim co-simulation platform, with open-loop characteristic studies conducted. Under rated operating conditions, the effects of varying compressor speed, expansion valve opening, low-temperature Polyalphaolefin (PAO) parameters, and high-temperature PAO parameters on critical system parameters such as evaporation pressure and heat exchange capacity were analyzed. Results show that increasing compressor speed leads to higher refrigerant flow rate, reduced evaporation pressure, and decreased coefficient of performance (COP); the system reaches peak heat exchange capacity at expansion valve opening of 40%, with incomplete evaporation occurring when the opening exceeds 50%; the influence of low-temperature PAO flow rate on the system stabilizes after reaching 150 L/min, while inlet temperature elevation significantly enhances performance of the system; the inlet temperature of high-temperature PAO significantly impacts system parameters, where temperature

increase causes sharp condensation pressure rise and COP decline. The established co-simulation model integrates AMESim's advantages in physical mechanism modeling accuracy with Python's flexibility in algorithm integration and interactive design, obtaining system characteristics and influence patterns under selected component parameters and operating conditions. This provides theoretical support for optimizing the design and developing the control strategies of airborne thermal management systems.

Key words: airborne evaporation cycle, dynamic simulation, AMESim, Python, open-loop characteristic analysis

引 言

随着航空技术向高功率密度、多电化方向快速演进,机载电子设备的功率与热负荷呈几何级增长,同时气动热、发动机废热等外部热源的影响也日益突出^[1-2]。在此背景下,飞机综合热管理系统(Thermal Management System, TMS)已成为保障飞行安全与性能的关键技术^[3-5]。TMS 由多个冷却循环耦合构成,其中蒸发冷却循环(Vapor Cycle System, VCS)作为核心子系统,通过高效的相变传热机制吸收并转移机载设备热量,直接决定着机载电子设备散热、座舱环境调控等关键功能的实现。然而,VCS 内部压缩机、膨胀阀、换热器等部件间存在复杂的热力耦合关系,导致系统呈现高度非线性的动态特性^[6],基于单一工况的传统设计方法难以满足多工况协同优化需求。因此,深入开展蒸发冷却循环的多维度特性分析,揭示其部件匹配机制与能量传递规律,对提升航空热管理系统能效具有重要意义。

针对蒸发循环、空气循环及 PAO 循环等热管理系统的仿真研究始于 20 世纪 70 年代,早期主要聚焦于稳态分析,难以反映系统在复杂工况下的动态特性。近年来,国内外学者开始深入研究系统动态响应特性。Liu 等人^[7]基于 Matlab/Simulink 仿真平台构建了 TMS 模型库,采用蒙特卡洛法简化 VCS 模型,并通过响应面方法(RSM)进行实验验证。袁美名等人^[8]在 Matlab/Simulink 平台建立各子系统动态数学模型,分析了系统动态响应规律。金敏^[9]利用 EASY5 软件搭建某型歼击机蒸发冷却系统仿真平台。龙海^[10]以 R142ab 为工质,建立机载蒸发循环系统动态仿真模型,并通过实验数据验证了模型的准确性。

然而,现有研究多采用单一仿真工具,存在参数调整效率低、数据处理繁琐等问题^[11],且对系统与部件间动态耦合行为的关注不足,难以全面揭示关

键工况参数对系统性能的综合影响规律。为突破上述瓶颈,本文以飞机蒸发冷却循环为研究对象,提出基于 AMESim 与 Python 的联合仿真方法,旨在充分发挥 AMESim 在热流体建模方面的精度优势与 Python 在数据处理与参数化分析方面的灵活性^[12-13]。通过该平台,本文系统研究了压缩机转速、膨胀阀开度、高/低温 PAO 流量与温度等关键参数对系统热力性能的影响规律,揭示了部件间的耦合机制和系统优化潜力,为飞行器综合热管理系统的多工况协同设计与参数匹配优化提供理论依据与技术支撑。

1 机载蒸发循环系统工作原理

机载蒸发循环系统主要通过制冷剂的相态变化来实现能量传递^[14],将机上电子设备的热载荷从低温液冷循环高效传递到高温液冷循环,如图 1 所示,主要由压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器 4 大部件组成,压缩机和电子膨胀阀是该系统流量调节的关键执行机构^[15]。

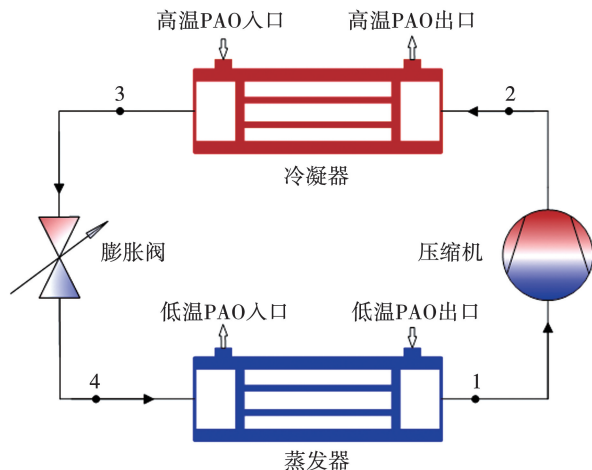


图 1 蒸发循环系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of evaporation cycle system

图 2 为蒸发循环系统的热力循环压焓图。

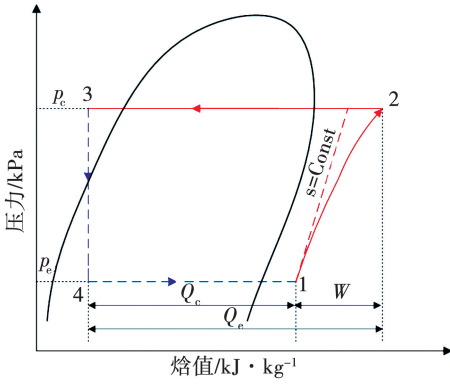


图 2 蒸发循环系统热力循环图

Fig. 2 Thermal cycling diagram of evaporation cycle system

该系统的热力循环包括绝热压缩、等压放热、绝热膨胀和等压吸热 4 个热力过程。其工作原理如下:压缩机从蒸发器出口吸入状态点 1 的过热蒸汽,经压缩后形成状态点 2 的高温高压过热蒸汽,此过程消耗功率 W ,理想情况下沿 $s = \text{Const}$ 等熵线进行,实际过程为绝热压缩;随后,过热蒸汽进入冷凝器,在冷凝压力 p_c 下向作为冷却剂的高温 PAO 释放热量 Q_c ,自身冷却为状态点 3 的饱和或过冷液体;液态制冷剂流经膨胀阀后压力降低,转变为状态点 4 的低温气液两相状态之后进入蒸发器;在蒸发器内,制冷剂在蒸发压力 p_e 下吸收作为载冷剂的低温 PAO 的热量 Q_e ,最终形成具有一定过热度的气体。

2 建模与仿真方法

忽略各循环部件的位能和动能变化^[16]、压缩机、换热器与环境之间的传热、部件间的热损失和管内压降变化,并假设膨胀阀中的节流过程为等焓过程,建立具体部件模型。

2.1 压缩机

压缩机的核心参数包括质量流量 $\dot{m}$ 、功耗 W_{comp} 和等熵效率 $\eta_{\text{isentropic}}$,表达式为^[10]:

$$\dot{m} = \rho \cdot V_{\text{disp}} \cdot N \quad (1)$$

式中: ρ —制冷剂密度; V_{disp} —排量; N —转速。

$$W_{\text{comp}} = \dot{m} \cdot (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) / \eta_{\text{isentropic}} \quad (2)$$

式中: h_{in} 、 h_{out} —进、出口焓值。

2.2 相变换热器

在蒸发循环制冷系统中,蒸发器和冷凝器均为相变换热器^[17],由于 AMESim 软件中尚未提供液 -

液工况下板翅式换热器的直接建模模块,本文选用如图 3 所示的多个套管式换热器模型组成的整体模型进行等效替代,建立包含制冷剂侧和液体侧的换热器模型^[18]。

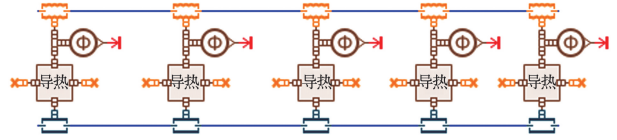


图 3 相变换热器模型

Fig. 3 Phase transformation heater model

换热能量守恒方程为:

$$Q = \dot{m}(h_{\text{in}} - h_{\text{out}}) = k \cdot A \cdot \Delta T \quad (3)$$

式中: Q —换热量; k —对流传热系数; A —换热面积; ΔT —进出口温差。

单相流体对流传热系数表达式为:

$$k_1 = Nu \cdot \lambda / D_h \quad (4)$$

式中: k_1 —单相流体的对流传热系数; Nu —努塞尔数; λ —导热系数; D_h —管路直径。

制冷剂为单相时,层流状态下的努塞尔数在 AMESim 中默认为 3.66,湍流状态按格林尼斯基关系式计算:

$$Nu = \frac{(f/8) Re \cdot Pr}{1.07 + 12.7(f/8)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5)$$

式中: f —摩擦因子; Re —雷诺数; Pr —普朗特数。

防冻液侧湍流关系式同样为格林尼斯基公式,层流采用以下公式计算:

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 \cdot \frac{D_h}{9} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0.04 \left(\frac{D_h}{9} \cdot Re \cdot Pr \right)^{2/3}} \quad (6)$$

对于相变区流体,冷凝过程采用 Shah 关联式计算换热:

$$k_f = k_l \left[(1-x)^{0.8} + \frac{3.8x^{0.76} (1-x)^{0.04}}{Pr_l^{0.38}} \right] \quad (7)$$

式中: k_f —两相流体的对流传热系数; x —制冷剂干度; Pr_l —单相流体的普朗特数。

蒸发沸腾过程采用 VDI horizontal tubes 模型计算:

$$k_f = \sqrt[3]{k_{\text{cv}}^3 + k_{\text{NeB}}^3} \quad (8)$$

式中: k_{cv} —对流沸腾传热系数; k_{NeB} —核态沸腾传热系数。

2.3 膨胀阀

膨胀阀核心参数为焓值和流量^[19]：

进出口满足如下等焓关系：

$$h_{in} = h_{out}$$
 (9)

即膨胀过程无能量交换。

流量计算式如下：

$$\dot{m} = C_v \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho}$$
 (10)

式中： C_v —流量系数，与阀的开度和过热度相关； Δp —阀门进出口压差； ρ —流体密度。

2.4 整体模型

根据系统的工作原理，在前文部件模型的基础上，基于 AMESim 建立蒸发循环系统仿真模型，如图 4 所示。

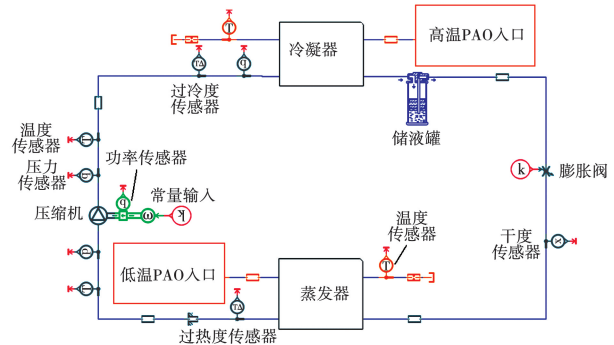


图 4 AMESim 蒸发循环系统仿真模型
Fig. 4 AMESim evaporation cycle system simulation model

其中，蒸发循环形成闭式回路，压缩机转速和膨胀阀开度为执行机构的可调参数，蒸发器和冷凝器冷却液侧的温度、流量为外部输入参数。循环主回路的制冷剂采用 R1234ze，与其交联的冷凝器冷边和蒸发器热边工质均为 65 号防冻液，换热器材料均采用铝。

2.5 基于 Python 和 AMESim 的联合仿真

AMESim 支持 Python 等高级语言与模型的交互，可实现参数设定、线性分析和批量运行等任务。本文采用 Python 与 AMESim 联合仿真框架，充分发挥两者协同优势以提升系统建模与分析的效率及灵活性。图 5 为所建立的 Python-AMESim 联合仿真示意图。在 AMESim 模型中创建所需输入参数为全局参数，并定义关键输出参数的提取路径，基于 AMESim 提供的脚本接口，通过在 Python 中编写函数，以实现模型参数的批量配置、模型运行、多工况

自动调度及仿真进程的实时监控，显著降低了手动操作的冗余性，提高了流程的自动化水平。同时，依托 Python 中 NumPy、Matplotlib 等强大的数据处理库，实现了仿真结果的高效后处理与多维可视化，克服了 AMESim 原生后处理功能在复杂数据关联分析中的局限性。这种联合仿真方法既保留了 AMESim 在物理机理建模上的精度优势，又融合了 Python 在算法集成与交互设计上的灵活性，为机载蒸发循环系统等综合热管理系统的参数优化、实时仿真和控制系统设计提供了高效可靠的技术路径。



图 5 Python-AMESim 联合仿真示意图
Fig. 5 Python-AMESim co-simulation diagram

3 结果与特性分析

3.1 额定工况

仿真计算的初始参数为：初始温度 20 ℃，初始蒸发压力 300 kPa，初始冷凝压力 2 000 kPa，压缩机转速选择为 5 000 r/min，膨胀阀开度为 40%，高温 PAO 流量为 130 L/min，低温 PAO 流量为 130 L/min，高温 PAO 和低温 PAO 的入口温度分别为 55 和 35 ℃。仿真动态结果及稳态结果如图 6 和图 7 所示，蒸发器出口过热度为 6.40 ℃，冷凝器出口过冷度为 5.30 ℃，压缩机功率最终达到 13.8 kW，制冷量达到 43.5 kW。

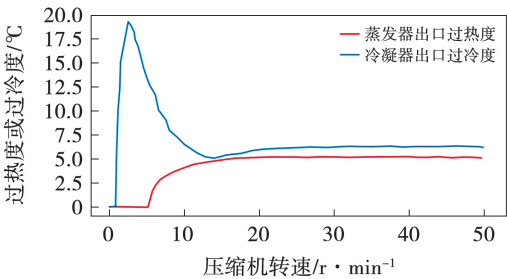


图 6 蒸发器出口过热度与冷凝器出口过冷度动态特性图

Fig. 6 Dynamic characteristic diagram of evaporator outlet superheat and condenser outlet supercooling

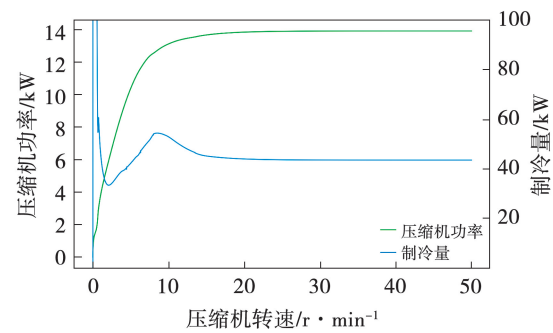


图 7 制冷量和压缩机功率动态特性图

Fig. 7 Dynamic characteristic diagram of refrigeration capacity and compressor power

3.2 压缩机转速对系统的影响

研究系统的开环特性,即通过控制变量法研究可调执行机构参数或通过换热器交联的其他系统入口参数对系统关键参数的影响。首先研究压缩机转速对系统重要参数和性能的影响,保持其他输入参数不变,仅改变压缩机转速,范围为 3 000 ~ 10 000 r/min 时,系统各参数变化如图 8 所示。由图 8 可知,压缩机转速最直接影响单位时间内吸气-压缩-排气循环次数,使得理论进排气量增加,压缩机功率必然增加,压缩机转速由 3 000 r/min 增大到 10 000 r/min 时,制冷剂制冷流量由 0.324 kg/s 增加到 0.429 kg/s。由于膨胀阀开度不变,而压缩机吸气流量增大,因此蒸发器进液量小于出液量,制冷剂存量减少,呈现蒸发压力下降的现象,同理可得冷凝压力上升。当压缩机转速低于 4 000 r/min 时,制冷剂质量流量不足,蒸发压力较高,在蒸发器内吸热不充分,无法完全蒸发,蒸发器出口干度在 0.95 以下,呈现两相态,所以过热度为 0;随着转速升高,蒸发器制冷剂进口温度和蒸发压力随之降低,出口温度增加缓慢,出口过热度迅速升高。由于压比增大,冷凝器进口制冷剂温度升高,冷凝器换热能力增强,出口制冷剂温度基本不变,由于冷凝压力升高,导致过冷度也呈增大趋势。换热器的换热量和压缩机功率均增加,而相比压缩机耗功,制冷量增加幅度较小,所以制冷系数下降。

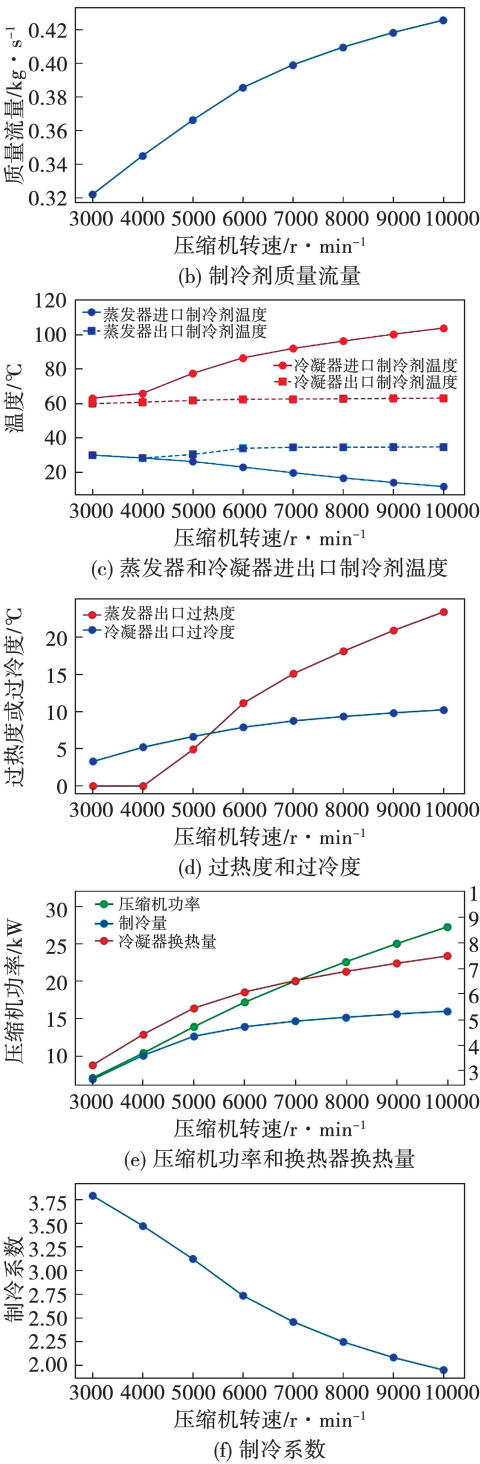
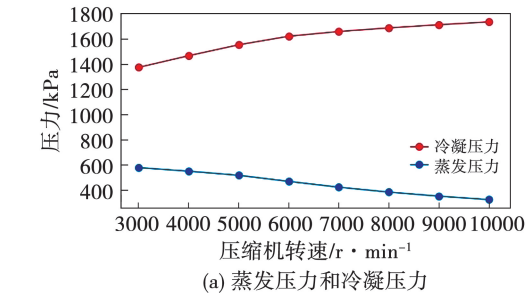


图 8 压缩机转速对系统参数的影响

Fig. 8 Effects of compressor speed on system parameters

3.3 膨胀阀开度对系统的影响

保持系统其他参数不变,膨胀阀开度由 20% 增大到 80%,系统各参数仿真结果如图 9 所示。

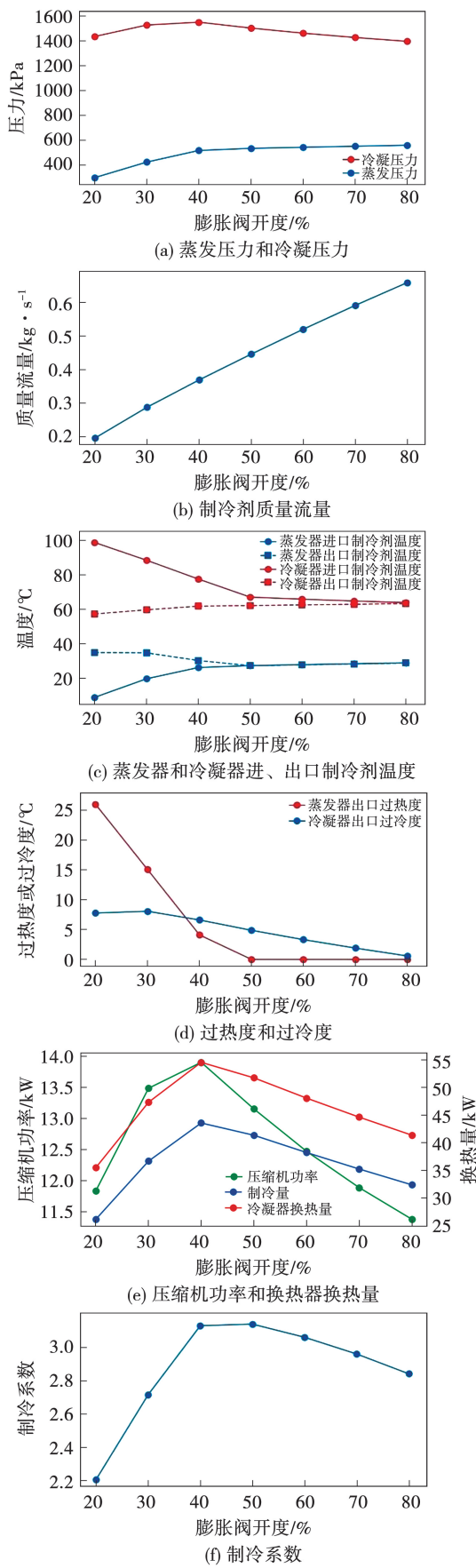


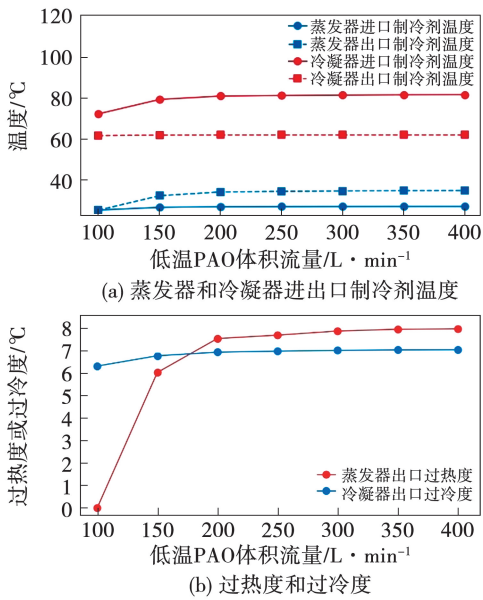
图 9 膨胀阀开度对系统的影响

Fig.9 Effects of expansion valve opening on the system

膨胀阀开度决定导致流通面积,节流阻力减小,更多制冷剂进入蒸发器,导致制冷剂质量流量增加,蒸发压力上升。由图 9 可知,制冷剂质量流量由 0.19 kg/s 增大到 0.65 kg/s,其变化幅度远高于压缩机转速变化时的流量波动。在此过程中,压缩机功率变化不大,而蒸发器换热量即制冷量和冷凝器换热量呈先增加后减少的趋势,由于换热面积和液体侧入口参数不变,受换热能力限制,包括制冷量和冷凝器换热量在内的换热器换热量在膨胀阀开度 40% 左右到达峰值,同时质量流量显著增加使得制冷剂蒸发不完全,从而使出口过热度逐渐下降,在膨胀阀开度 50% 左右时,蒸发器出口过热度 0,此时干度为 0.89,开始呈现两相态,影响实际换热面积和换热效果,换热量和制冷系数下降。最终,随着膨胀阀开度进一步增大,制冷剂干度不断下降,进而影响整个循环性能,换热效果极差,蒸发器和冷凝器制冷剂进出口温度近似重合。

3.4 低温 PAO 参数对系统的影响

低温 PAO 循环直接与冷板进行热交换,蒸发器中低温 PAO 侧入口参数与电子设备热载荷相关,需要研究与蒸发循环交联的蒸发器处入口温度和流量的影响规律。低温 PAO 的流量通过低温 PAO 循环回路上的泵进行调节,保持系统其他参数不变,蒸发器低温 PAO 侧流量由 100 L/min 增加到 400 L/min,即流量增大到 4 倍过程中,系统各参数仿真结果如图 10 所示。



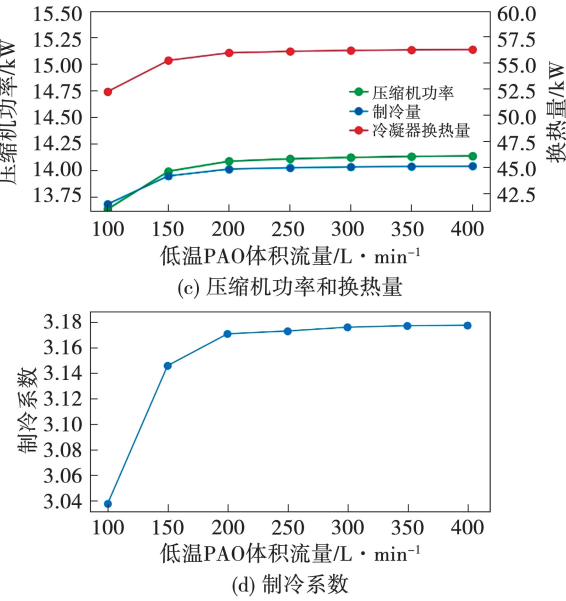


图 10 低温 PAO 体积流量对系统的影响

Fig. 10 Effects of low-temperature PAO volume flow on the system

由图 10 可知,低温 PAO 体积流量对蒸发器的制冷剂影响相对较大,出口过热度先急剧上升,体积流量为 150 L/min 后上升趋势平缓,冷凝器出口过冷度平稳增加,压缩机功率基本不变,制冷量略微升高,因此制冷系数上升。保持系统其他参数不变,蒸发器低温 PAO 侧入口温度由 30 ℃ 增加到 50 ℃ 过程中,系统各参数仿真结果如图 11 所示。

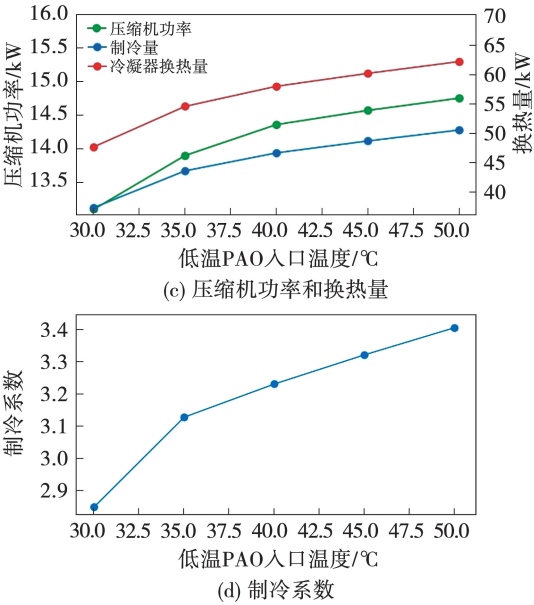


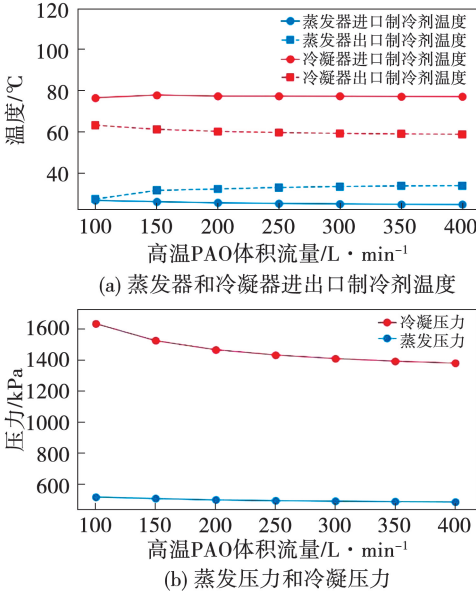
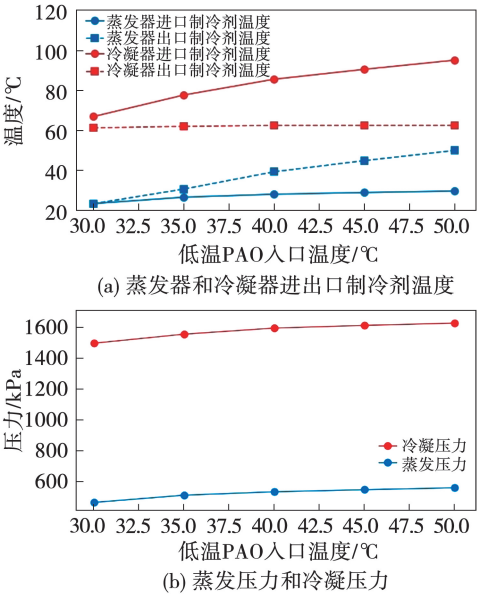
图 11 低温 PAO 入口温度对系统的影响

Fig. 11 Effects of low-temperature PAO inlet temperature on the system

由图 11 可知,当低温 PAO 进口温度变化时,蒸发器出口制冷剂温度随之呈线性增大,由于对压缩机影响不大,冷凝器进口温度也呈现相同的变化趋势,蒸发压力和冷凝压力略有增加。压缩机功率基本保持不变,换热器换热量有所增加,因此制冷系数持续上升。

3.5 高温 PAO 参数对系统的影响

高温 PAO 循环将蒸发循环中的热量传递到燃油循环和空气循环,研究其在冷凝器处与蒸发循环交联时的入口温度和流量变化对系统的影响规律也非常重要。保持系统其他参数不变,冷凝器冷却剂侧流量由 100 L/min 增加到 400 L/min 时,系统各参数仿真结果如图 12 所示。



(a) 蒸发器和冷凝器进出口制冷剂温度

(b) 蒸发压力和冷凝压力

(a) Evaporator and condenser inlet and outlet refrigerant temperatures

(b) Evaporator and condenser pressures

(a) 蒸发器和冷凝器进出口制冷剂温度

(b) 蒸发压力和冷凝压力

(a) Evaporator and condenser inlet and outlet refrigerant temperatures

(b) Evaporator and condenser pressures

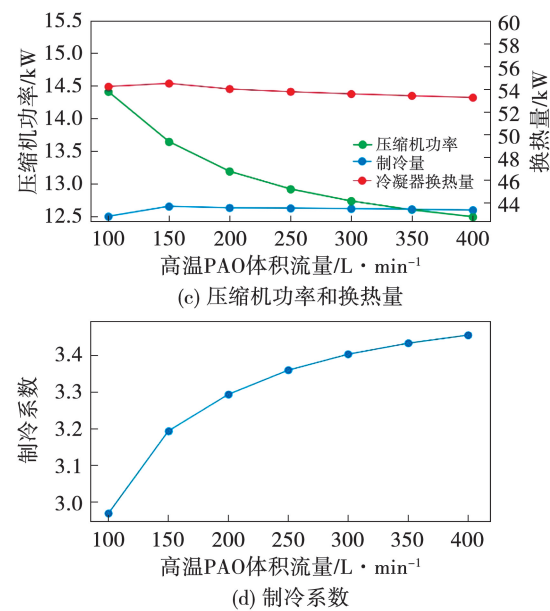


图 12 高温 PAO 体积流量对系统的影响

Fig. 12 Effects of high-temperature PAO volume flow on the system

由图 12 可知,高温 PAO 流量对冷凝器侧参数影响相对较大,蒸发压力和冷凝压力会随着高温 PAO 体积流量的增大而略微减小,冷凝器出口制冷剂温度降低幅度不大。压缩机功率降低,制冷量变化不大,从而使系统的制冷系数增大。保持系统其他参数不变,冷凝器冷却剂侧入口温度由 40 $^{\circ}\text{C}$ 增加到 60 $^{\circ}\text{C}$ 时,系统各参数仿真结果如图 13 所示。

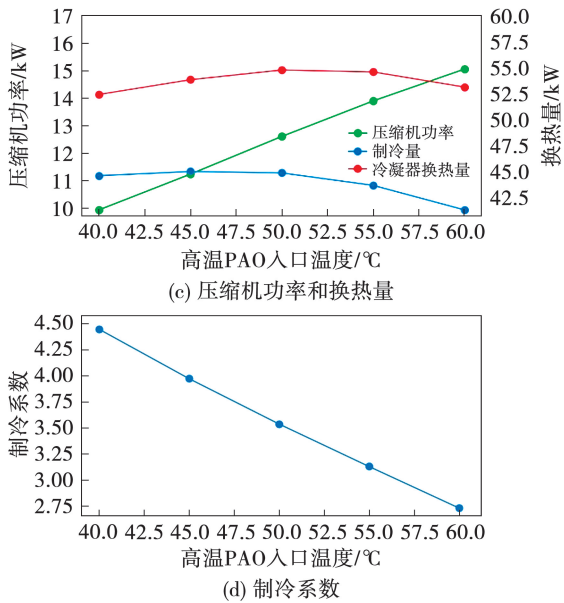


图 13 高温 PAO 入口温度对系统的影响

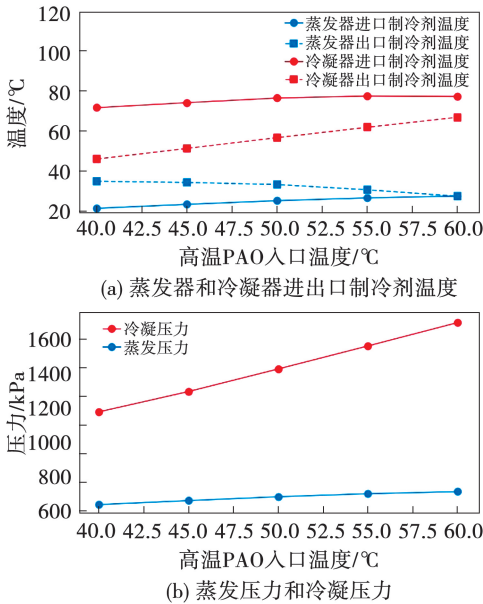
Fig. 13 Effects of high-temperature PAO inlet temperature on the system

由图 13 可知,与高温 PAO 流量、低温 PAO 入口温度相比,高温 PAO 入口温度对系统的影响更加显著。随着高温 PAO 入口温度增加,蒸发器进口制冷剂温度上升,出口温度略有下降,蒸发压力略有增加。冷凝器参数变化更为急剧,冷凝压力大幅线性增加导致压比增高,即冷凝器进口温度提高。由于冷凝器换热能力较强,其出口制冷剂温度也升高。制冷系数减小,这是因为压缩机功率由于压比和制冷剂流量的升高而增大,而制冷量变化较小。

4 结 论

(1) 压缩机转速在 3 000 ~ 10 000 r/min 增加的过程中,系统热力参数发生显著变化,反映出各部件之间的强耦合关系。转速升高导致制冷剂质量流量和压缩机功率上升,蒸发压力下降、冷凝压力升高,从而影响换热效率与系统稳定性。在低转速下,系统存在蒸发不完全现象;而在高转速下虽提升了换热能力,但降低了系统能效,因此需合理设置压缩机转速范围。

(2) 膨胀阀开度由 20% 增加到 80% 的过程中,制冷剂质量流量显著上升,当变化范围大于压缩机转速变化时,蒸发压力提高,但换热器换热量在开度 40% 时达到峰值,随后逐渐下降。并开度超过 50% 后,蒸发器内出现明显两相流,过热度趋近于零,导



致实际换热面积减小、系统换热效率下降,因此需调节膨胀阀开度以维持蒸发器出口一定的过热度。

(3) 蒸发器低温 PAO 侧流量由 100 L/min 增加至 400 L/min 时,对系统影响较小。当过热度、出口温度等参数在体积流量为 150 L/min 后,变化趋于饱和。入口温度升高对各参数影响更为显著,蒸发器出口温度升高,换热量增大,制冷系数上升。这表明在此换热能力和入口温度下,流量变化对性能影响有限,而温度变化在此体积流量下对系统有一定影响。

(4) 冷凝器高温 PAO 侧体积流量增大时,蒸发压力与冷凝压力均小幅降低,制冷系数因压比优化而提升。入口温度升高影响相对明显,导致冷凝压力及压比激增,压缩机功率大幅上升,制冷系数下降。实际应用中需优先控制入口温度,并协同调节流量以缓解压比压力,从而优化系统效率。在此额定参数下,高低温 PAO 均出现入口温度影响大于流量影响的情况,后续可进一步研究高低温 PAO 流量与入口温度的匹配关系。

参考文献:

[1] DOOLEY M, LUI Ni, NEWMAN R, et al. Aircraft thermal management-Heat sink challenge[C]//SAE 2014 Aerospace Systems and Technology Conference, 2014.

[2] VAN HEERDEN A S J, JUDT D M, JAFARI S, et al. Aircraft thermal management: Practices, technology, system architectures, future challenges, and opportunities[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2022, 128: 100767.

[3] 周 旭, 姜春英, 李胜宇, 等. 机载综合热管理系统控制特性分析[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 511-522.

ZHOU Xu, JIANG Chunying, LI Shengyu, et al. Analysis of control characteristics of airborne integrated thermal management system[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 511-522.

[4] CHOWDHURY S H, ALI F, JENNIONS I K. A review of aircraft environmental control system simulation and diagnostics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2023, 237(11): 2453-2467.

[5] JAFARI S, NIKOLAIDIS T. Thermal management systems for civil aircraft engines: Review, challenges and exploring the future[J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2044.

[6] 唐 玫, 胡娅萍, 王 强, 等. 飞行器简化模型热管理系统的非稳态仿真[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(3): 58-65.

TANG Mei, HU Yaping, WANG Qiang, et al. Unsteady simulation of thermal management system of a simplified aircraft model[J].

Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(3): 58-65.

[7] LIU H, JIANG H, DONG S, et al. Simulation of an aircraft thermal management system based on vapor cycle response surface model[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(6): 64-77.

[8] 袁美名, 常士楠, 洪海华, 等. 飞机机载综合热管理系统仿真研究[J]. 航空科学技术, 2008(4): 30-34.

YUAN Meiming, CHANG Shinan, HONG Haihua, et al. Simulation of aircraft integrated thermal management system[J]. Aeronautical Science and Technology, 2008(4): 30-34.

[9] 金 敏. 歼击机蒸发制冷循环系统控制与仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.

JIN Min. Control and simulation of evaporative refrigeration cycle system for fighter aircraft[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.

[10] 龙 海. 机载蒸发循环系统动态仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

LONG Hai. The dynamic simulation of airborne vapor cycle system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

[11] 张 涛. 多电飞机一体化热管理仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

ZHANG Tao. Simulation research on integrated thermal management of multi-electric aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[12] 廖高良, 孙泽泰, 张 峰. 基于遗传算法的燃气轮机叶片内部柱肋蒸汽冷却通道的优化分析[J]. 热能动力工程, 2022, 37(8): 48-56.

LIAO Gaoliang, SUN Zeqin, ZHANG Feng. Optimization analysis of internal pin-fins steam cooling channel of gas turbine blade based on genetic algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 48-56.

[13] 赵 甜, 贺克伦, 陈 群. 飞行器热管理系统的流量建模及优化[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(9): 2448-2454.

ZHAO Tian, HE Kelun, CHEN Qun. Heat current modeling and optimization of aircraft thermal management systems[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(9): 2448-2454.

[14] 李益斌. 基于 AMESim 的飞机综合环控系统仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

JI Yibin. Research on the simulation of aircraft integrated environmental control system based on AMESim[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[15] 胡鹏荣, 陶乐仁, 何 俊. VRF 制冷系统变吸气状态下频率与阀开度的同步调节[J]. 热能动力工程, 2020, 35(3): 19-26.

HU Pengrong, TAO Leren, HE Jun. Synchronous adjustment of frequency and valve opening in VRF refrigeration system under variable suction condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 19-26.