

飞机蒸发制冷循环制冷剂充注量影响研究

毛晓东, 张昊, 李申思, 温伊龙

(沈阳航空航天大学航空发动机学院, 沈阳, 110136)

摘要 针对制冷剂充注量影响蒸发制冷循环系统工作性能的问题,建立了飞机蒸发制冷循环系统一维仿真模型,计算并分析了飞行包线范围内不同温度下制冷剂充注量对压缩机转速、压缩机排气特性、压缩机功耗和制冷性能系数(COP)及过冷度的影响。结果表明,无论是过充还是欠充均会对系统性能产生不利影响。在不同环境温度下,压缩机最小功耗与系统最大COP对应的最佳充注量存在差异,并随环境温度上升而增大。此外,过冷度被认为是评估最佳制冷剂充注量的关键指标,其稳定段仅与充注量相关,且在该范围内,不同工况条件下的压缩机功耗和系统COP均处于较好的性能。该研究结果对飞机蒸发制冷循环系统最佳制冷剂充注量的确定提供了依据。

关键词 蒸发制冷循环;制冷剂充注量;一维系统仿真;过冷度

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.04.004

中图分类号 V245 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)04-0030-10

A Study of Influence of Refrigerant Charge Amount on Evaporative Refrigeration Cycle for Aircraft

MAO Xiaodong, ZHANG Hao, LI Shensi, WEN Yilong

(School of Aero-Engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract A one-dimensional simulation model is established in aircraft evaporative cooling cycle system with the impact of refrigerant charge being exerted on the performance in evaporative cooling cycle system. The paper calculates and analyzes the effects of refrigerant charge on compressor speed, compressor discharge characteristics, compressor power consumption, COP (coefficient of performance), and sub-cooling degree at different temperatures within the flight envelope. The results show that whether to overcharge or undercharge exerts all an unfavorable influence on the performance of system. At different ambient temperatures, there are differences in the optimal charge amounts corresponding to the minimum compressor power consumption and the maximum system COP in increasing with the rise at ambient temperature. In addition, the sub-cooling degree is regarded as a key indicator for evaluating the optimal refrigerant charge amount, whose stable section is only related to the charge amount within the range. The compressor power consumption and the system COP under different working conditions are good in performance. The research results provide a basis for determining the optimal refrigerant charge flow in the aircraft evaporative refrigeration cycle system.

收稿日期: 2025-03-14

基金项目: 辽宁省兴辽英才计划(XLYC1802092)

作者简介: 毛晓东(1984—),男,辽宁大连人,副教授,博士,研究方向为飞行器环控系统。E-mail:maoxiaodong@sau.edu.cn

引用格式: 毛晓东,张昊,李申思,等.飞机蒸发制冷循环制冷剂充注量影响研究[J].空军工程大学学报,2025,26(4):30-39. MAO Xiaodong, ZHANG Hao, LI Shensi, et al. A Study of Influence of Refrigerant Charge Amount on Evaporative Refrigeration Cycle for Aircraft[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(4):30-39.

Key words evaporative refrigeration cycle; refrigerant charge; one-dimensional system simulation; condensate depression

随着航空工业的迅速发展,飞行器在军事、民用和救援等多个领域的应用日益广泛^[1-3]。然而,在飞行过程中,飞机面临着散热的难题,尤其是在高负荷工况和极端环境条件下,热量的积聚会显著影响电子设备的性能与可靠性^[4]。作为环境控制系统的重要组成部分,制冷系统承担了飞机的大部分散热任务^[5]。随着时间的推移,制冷系统的结构经历了很大的发展,从最初的空气循环制冷系统演变到蒸发制冷系统,再到最近的蒸发制冷系统结合泵驱动的液冷循环系统^[6-8]。在这些构型中,带有液冷回路的蒸发制冷系统因其冷却效率高、代偿损失小等特点,常被用于冷却大功率、高热流密度的电子设备^[9]。

制冷剂是蒸发制冷系统中用于传递和排出热量的核心介质。在飞机蒸发制冷系统中,制冷剂通过循环过程吸收液冷回路内的热量,并将其转移到外部冲压空气中,其充注量的合理配置对系统的运行效率、能耗、重量以及安全性有重要影响^[10]。

目前,关于制冷剂充注量的研究已有不少成果。文献[11]研究结果表明,制冷剂欠充和过充都会对系统造成不利影响,存在一个最佳制冷剂充注量使得系统的制冷性能系数(Coefficient of performance, COP)最佳。文献[12]研究了制冷剂充注量对CO₂电动车热系统吸能的影响,发现热泵模式下,制冷剂需求下限随环境温度的升高、室内风量的降低和室外风速的增加而增大,其定量影响幅度为18.6%、6.16%和18.9%。文献[13]在冷藏工况下对系统进行了最佳充注量的实验研究。实验结果表明,随着系统内制冷剂充注量的不断增加,排气温度降低了11.7%,排气压力升高了12.7%,系统制冷量、COP均随之先升高后下降。文献[14]综合制冷和制热工况规律,最终确定该热泵装置的最佳充注量为5 kg。文献[15]调查了制冷剂充注量对家用制冷系统性能的影响。结果表明,在最佳条件下,蒸发器空气温度和能耗分别降低了5.26%~26.32%和0.13%~14.09%。文献[16]通过搭建CO₂汽车空调系统实验平台,研究了标准化制冷剂充注量对温度、压力和系统性能的影响。最后,提出了一种判定最佳制冷剂充注量的新标准。文献[17]对无油制冷系统的能源效率进行了测试。结果表明,对于给定的压比和冲程,排气压力随着制冷剂充注量的增加而增加。文献[18]评估了制冷剂充注量对太阳能辅助热泵地板辐射采暖系统的影响。结果表明,当系统制冷剂充注量增加时,冷凝器内冷凝压力和过

冷度增大,导致压缩机功率增大。文献[19]分析了制冷剂充注量对电动汽车空调热泵系统的性能影响。结果发现,制冷剂充注量对系统内不同位置制冷剂特性的影响不同。

尽管关于制冷剂充注量的研究已取得诸多成果,但大部分研究主要集中于常规空调系统或汽车空调系统,针对飞机制冷系统的研究相对较少。常规空调系统的工作环境相对稳定,而飞机在飞行过程中所处的环境则复杂多变,这对最佳制冷剂充注量的确定提出了新的要求^[20]。

目前,关于制冷系统中制冷剂充注量的研究方法主要依赖于搭建实验台架进行性能分析。文献[21]通过构建电动汽车空调与蓄电池直流双制冷回路系统的实验平台,探讨了R134a、R152a和R1234yf 3种制冷剂充注量对系统性能的影响。文献[22]采用实验方法分析了R-744制冷剂充注量对在亚临界工况下运行的冷水机组性能的影响。结果表明,最大制冷量和性能系数所对应的最佳充注量存在差异。对于飞机蒸发制冷系统而言,由于其工作环境复杂多变且工况范围跨度较大(从-40~40℃),在研究其制冷剂充注量时,仅依靠实验方法不仅开发成本高昂,而且研发周期较长。因此,本文引入仿真方法,以提高研究效率并降低开发成本,对飞机蒸发制冷系统中的最佳充注量进行深入研究。

本文以飞机蒸发制冷系统为研究对象,基于一维仿真平台构建了相应的仿真模型。为确保仿真模型的可靠性,采用实验数据对冷凝器和蒸发器进行校准处理。研究了不同环境温度情况下,制冷剂充注量对压缩机转速、排气特性、功耗、系统COP及过冷度的影响,详细分析了其影响规律及原理。研究结果可为同类航空器制冷系统的设计与应用提供一定的参考。

1 系统描述

本文的研究对象为飞机的蒸发制冷系统。系统原理图如图1所示。系统由2个回路及控制组件组成,2个回路分别以R134a为制冷剂的蒸发制冷循环回路和以65号防冻液为工质的液冷循环回路,2个循环之间通过液-液换热器耦合在一起。

蒸发制冷循环回路主要由压缩机、冷凝器、储液瓶、膨胀阀和蒸发器构成。系统采用电动压缩机,冷凝器与蒸发器分别选用平行流式换热器和板翅式据

齿换热器,以提升换热效率和系统性能。储液瓶的主要功能是储存系统中多余的制冷剂,并调节系统内的制冷剂流量,以适应负荷变化。这种调节功能在系统负荷或环境条件变化时尤为重要,能够维持蒸发器和冷凝器的正常运行状态,确保系统效率。膨胀阀选用 F 型膨胀阀,可根据感温包反馈的压力信号自动调节节流口径,具备模拟电子膨胀阀的部分功能,提高系统控制的响应速度和精度。蒸发制冷循环的工作过程如下:制冷剂首先经压缩机压缩后压力与温度显著升高,进入冷凝器并将热量释放至外部冲压空气中,随后,经储液瓶稳定流量后进入膨胀阀进行降压和降温,低温低压的制冷剂进入液-液换热器,吸收液冷回路中的热量后,返回压缩机,完成一个闭合循环。

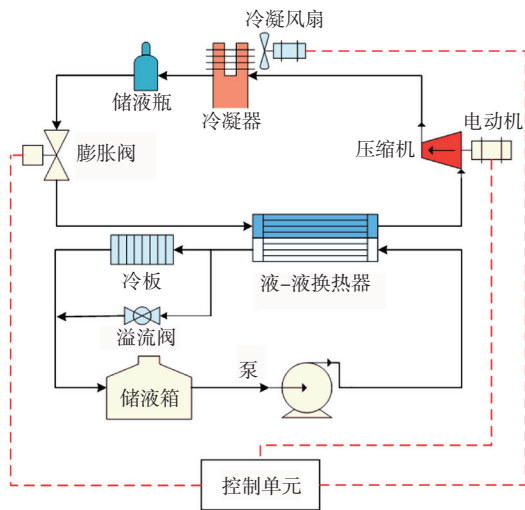


图 1 飞机蒸发制冷系统构型

Fig. 1 System schematic diagram

液冷循环回路包括增压泵、冷板、储液瓶、溢流阀和液-液换热器,循环工质为 65 号防冻液。液冷回路的工作流程如下:防冻液经增压泵升压后流经液-液换热器将热量转移到制冷回路,然后进入安装有电子设备的冷板,吸收电子设备散发的热量,并通过储液箱再次进入增压泵完成一个循环。此外,冷板设置了旁通支路,以便调节进入冷板的工质流量。

控制组件根据外界环境温度和制冷剂充注量的变化,调节制冷回路中压缩机转速、膨胀阀开度和冷凝风机风速,从而控制冷板入口防冻液温度、蒸发器出口过热度 and 冷凝器出口过冷度,以确保系统在不同工况下均能满足制冷需求。控制参数的工作范围见表 1。

表 1 控制参数的工作范围

Tab. 1 Working range of contral parameters

参数	范围
压缩机转速/(r · min ⁻¹)	1 500~5 000
冷凝风机风速/(m · s ⁻¹)	1~6
膨胀阀开度/mm ²	0~5

2 数学模型及实验校核

2.1 数学模型

2.1.1 压缩机

压缩机的功耗由下式计算:

$$W_C = \eta_C m_C (h_{C,out} - h_{C,in}) \quad (1)$$

式中: η_C 是机械效率; m_C 是制冷剂的质量流量; $h_{C,out}$ 是压缩机出口的焓值; $h_{C,in}$ 是压缩机进口的焓值。

制冷剂的体积流量是压缩机转速和排量的函数,由下式计算:

$$V_C = \eta_v N disp \quad (2)$$

式中: V_C 是压缩机的体积流量; η_v 为压缩机容积效率; N 是压缩机转速; $disp$ 为压缩机排量。

2.1.2 冷凝器

空气与冷凝器壁面换热量的计算式如下所示:

$$Q_{w,air} = \eta_w h_{w,air} A_w (T_w - T_{air}) + m_{air} L_v \quad (3)$$

式中: $Q_{w,air}$ 为空气与冷凝器壁面的换热量; η_w 为翅片的换热效率; A_w 为空气与冷凝器的换热面积; T_w 为冷凝器壁面温度; T_{air} 为空气的进口温度; m_{air} 为水蒸气的质量流量; L_v 为水的汽化潜热; $h_{w,air}$ 为空气与壁面的换热系数。

换热系数的计算式为:

$$h_{w,air} = \frac{Nu_{w,air} \lambda_{air}}{D_{air}} \quad (4)$$

式中: D_{air} 为空气侧的翅片水力直径; λ_{air} 为空气的热导率; $Nu_{w,air}$ 为努赛尔数。

$$Nu_{w,air} = a_{w,air} Re^{b_{w,air}} Pr^{c_{w,air}} \quad (5)$$

式中: Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; $a_{w,air}$, $b_{w,air}$ 和 $c_{w,air}$ 为由实验数据确定的相关系数。

制冷剂与冷凝器壁面换热量由下式计算:

$$Q_{w,r} = k_{w,heat} h_{w,r} A_w (T_r - T_{wall}) \quad (6)$$

式中: $k_{w,heat}$ 为换热增益因子,由实验数据获得; A_w 为换热面积; $T_{w,r}$ 为制冷剂的温度; $h_{w,r}$ 为制冷剂与冷凝器壁面的换热系数。

对流换热系数取决于制冷剂的状态;当制冷剂为两相流时,可以使用下式进行计算:

$$h_{con} = h_{l,ref} \left(1 - x_{ref} + x_{ref} \sqrt{\frac{\rho_{l,ref}}{\rho_{g,ref}}} \right)^{0.8} \quad (7)$$

式中: h_{con} 为对流换热系数; $h_{l,ref}$ 为液相的对流换热系数; x_{ref} 为制冷剂气体质量分数; $\rho_{l,ref}$ 为液相制冷剂的密度; $\rho_{g,ref}$ 为气相制冷剂的密度。其中,液相的对流换热系数由以下方程给出:

$$h_{l,ref} = 0.05 Re_{l,ref}^{0.8} Pr_{l,ref}^{\frac{1}{3}} \frac{\lambda_{l,ref}}{D_{l,ref}} \quad (8)$$

式中: $h_{l,ref}$ 为制冷剂液相的对流换热系数; $Re_{l,ref}$ 为

制冷剂液相的雷诺数; $Pr_{l,ref}$ 为制冷剂液相的普朗特数; $\lambda_{l,ref}$ 为制冷剂液相的热导率; $D_{l,ref}$ 为制冷剂液相的水力直径。

制冷剂在蒸发器内流动时,由于沿程摩擦阻力的影响会产生一定的压降。这部分的压降通过引入增益系数加以计算。制冷剂测总压降的计算式为:

$$\Delta p \approx k_p f \frac{4l}{D} \frac{g^3}{2\rho^2} A \quad (9)$$

式中: f 为摩擦因子; k_p 为压降增益系数,与蒸发器的结构参数和制冷剂的流动状态有关。 l 为蒸发器芯体的长度; D 为水力直径; g 为当地的重力加速度; ρ 为制冷剂的密度; A 为芯体的流通截面积。

2.1.3 液-液蒸发器

防冻液与蒸发器壁面的换热量为:

$$Q_{w,a} = h_{w,a} A_{w,a} (T_w - T_a) \quad (10)$$

式中: $Q_{w,a}$ 为防冻液与蒸发器壁面的换热量; $h_{w,a}$ 为换热系数,由实验数据确定; $A_{w,a}$ 为换热面积; T_a 为防冻液的平均温度; T_w 为蒸发器壁面温度。

2.1.4 膨胀阀

膨胀阀的开度如下所示:

$$O = \frac{F_{bu} - F_{eva} - F_{diff}}{st_{sp}} - l_{sp} \quad (11)$$

式中: O (英大) 为膨胀阀开度; F_{bu} 为感温包所受压力; F_{eva} 为蒸发器出口压力; F_{diff} 为膨胀阀进出口压力差; st_{sp} 为弹簧的固定系数; l_{sp} 为弹簧的长度。

流经膨胀阀的制冷剂流量由下式计算:

$$m_e = k_e A_e \sqrt{\rho_e (P_{e,in} - P_{e,out})} \quad (12)$$

式中: m_e 为制冷剂的质量流量; A_e 为膨胀阀的流通截面积; k_e 为增益系数; ρ_e 为制冷剂的密度; $P_{e,in}$ 为制冷剂进口压力; $P_{e,out}$ 为制冷剂出口压力。

2.1.5 冷板

冷板与防冻液之间的换热量由以下方程表示:

$$Q_{cp,ant} = \frac{Nu_{cp,ant} \lambda_{ant}}{h_{p,a}} A_{cp,ant} (T_{ant,out} - T_{ant,in}) \quad (13)$$

式中: $Nu_{cp,ant}$ 为冷板与防冻液之间的努塞尔数; λ_{ant} 为热导率; $h_{p,a}$ 为换热系数; $A_{cp,ant}$ 为冷板与防冻液的换热面积; $T_{ant,out}$ 为冷板出口防冻液温度; $T_{ant,in}$ 为冷板入口防冻液温度。

冷板与防冻液之间的努塞尔数由下式计算:

$$Nu_{cp,ant} = \sqrt[3]{Nu_{free}^3 + Nu_{forced}^3} \quad (14)$$

式中: Nu_{free} 为自然对流下的努塞尔数; Nu_{forced} 为强迫对流下的努塞尔数。

2.1.6 PID 控制器

压缩机、膨胀阀和冷凝器风扇均采用 PID 控制算法进行调节。PID 控制器的输出-输入关系如下:

$$v = K_p u + K_i \int_{t_{start}}^t u dt + K_d \frac{du}{dt} \quad (15)$$

式中: v 为输出信号; K_p 为比例增益; u 为输入信号; t 为时间; K_i 为积分增益; K_d 为微分增益。

2.2 实验校核

由于蒸发制冷循环涉及制冷剂相变,因此其仿真精度通常较低。为确保仿真计算结果的可信度,必须利用实验数据集对蒸发制冷循环进行参数校准。相变主要发生在两相换热器中,而压缩机和膨胀阀的仿真精度相对容易保证。因此,本文结合 2.1.2 节和 2.1.3 节所建立的理论模型,着重对冷凝器与蒸发器中工质与壁面间的对流换热系数进行参数校准,从而获取努塞尔关联式中的相关系数 a 、 b 、 c 以及换热增益因子 $k_{w,heat}$ 和压降增益系数 k_p ,以增强两者在相变区域的仿真精度。

根据文献[23]中的相关数据,在相同的部件结构参数和工况条件下,利用 AMESIM 平台建立冷凝器和蒸发器的校准模型,如图 2(a)和图 2(b)所示,将校准后的仿真结果与实验结果进行比较,验证结果如图 3 和图 4 所示。从图中可以看出,冷凝器和蒸发器换热量的仿真结果与实验结果之间的误差保持在 10% 以内,验证了仿真模型的可靠性。

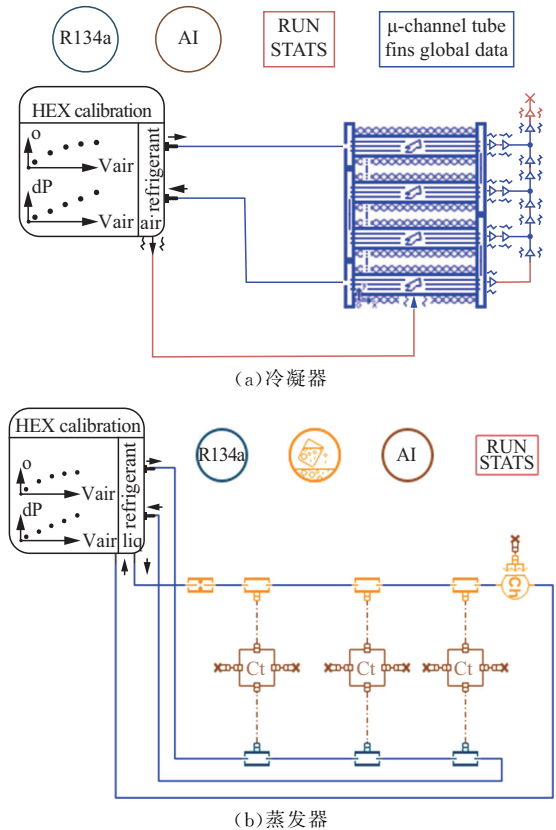


图2 换热器校核仿真模型

Fig. 2 Simulation model for the heat exchanger verification

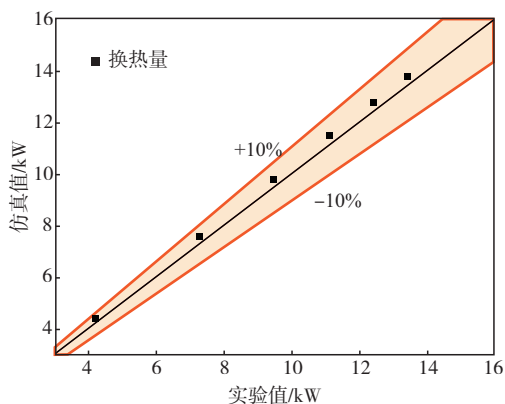


图 3 冷凝器换热量校核结果

Fig. 3 Verification result of heat exchange capacity

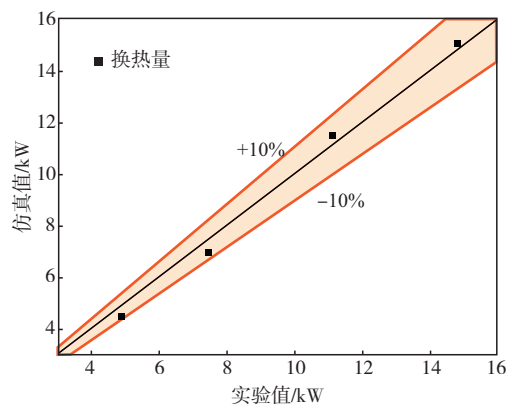


图 4 蒸发器换热量校核结果

Fig. 4 Evaporator heat transfer verification results

3 仿真研究

3.1 仿真模型

基于系统原理图和相应的数学模型,在 AMES-

IM 软件平台上搭建飞机蒸发制冷系统仿真模型如图 5 所示。图中,制冷回路以 R134a 为制冷剂,液冷回路以 65 号防冻液为工作介质,2 个回路通过液-液换热器耦合在一起。

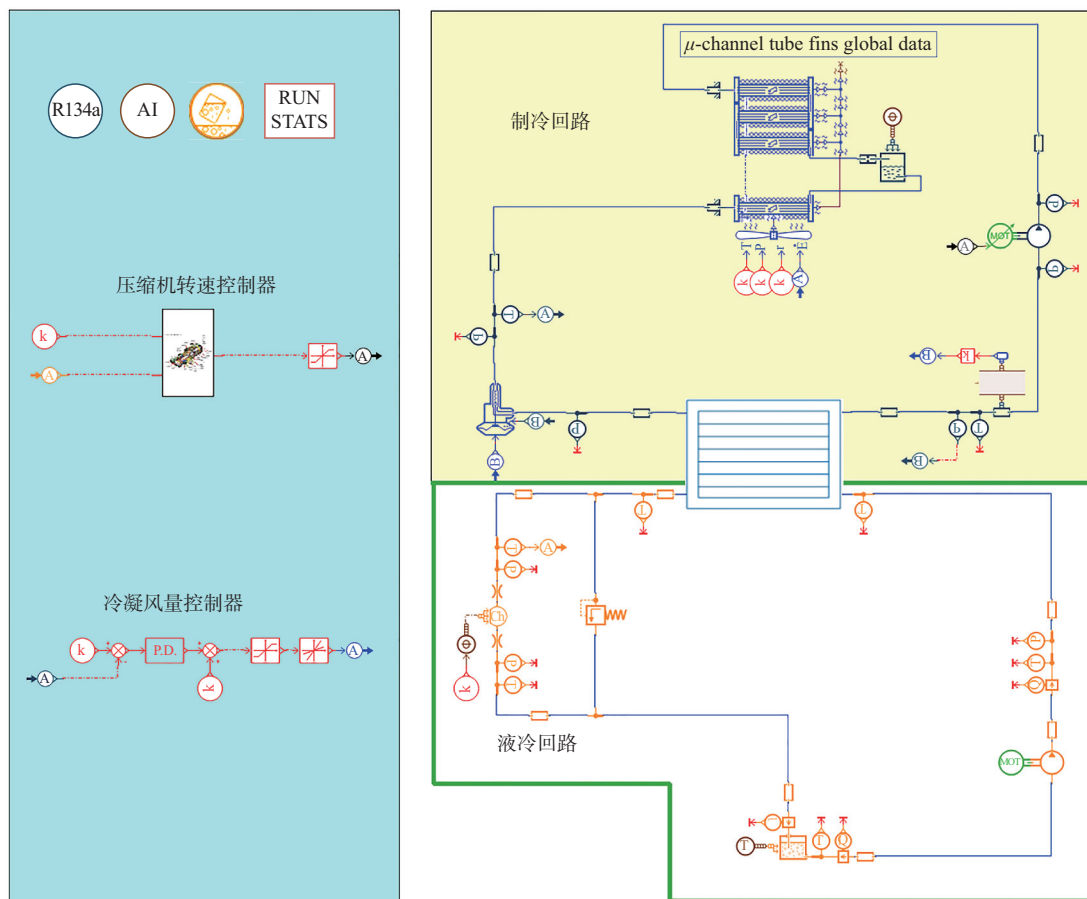


图 5 飞机蒸发制冷系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of the helicopter liquid cooling and vapor compression refrigeration system

3.2 仿真参数设置

为探索制冷剂充注量对飞机蒸发制冷系统影响,设定制冷剂充注量的工况范围为 200~600 g,间隔为 25 g,共计 16 个工况等级。仿真环境温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$;

空气相对湿度 40%;电子设备热载荷为 10 kW;鉴于环境压力对换热性能的影响较小,本文将环境压力固定为 100 kPa;其它详细的仿真工况及部件参数见表 2。

表 2 仿真工况
Tab. 2 Simulation conditions

参数	数值
压缩机排量/ cm^3	250.00
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	-40、15、20、25、30、35、40
热负荷/ kW	10.00
增压泵排量/ $(\text{cc} \cdot \text{rev}^{-1})$	100.00
压缩机容积效率	0.60
压缩机等熵效率	0.75
压缩机机械效率	0.90
膨胀阀最大流通面积/ mm^2	5.00
冷凝器结构尺寸/ mm	$640 \times 370 \times 20$
蒸发器结构尺寸/ mm	$270 \times 160 \times 80$
储液瓶容积/ L	0.05

对于环境温度的设定,经初步计算发现:当环境温度处于 $-40 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 范围内,系统各部件的热力性能随制冷剂充注量的变化幅度相对较小,这是由于当外界环境温度较低时,在控制组件的作用下,较小的冷凝风量就能满足系统的散热需求,此时,制冷剂充注量的变化主要反映在冷凝风量和膨胀阀开度的变化上,而系统各部件热力性能的变化则相对稳定,如图 6、图 7、图 8、图 10 和图 11 中 -40°C 、 15°C 的曲线所示。

而当环境温度处于 $20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围内,系统各部件的热力性能随制冷剂充注量的变化则十分剧烈,这是由于当环境温度上升到 20°C 以上,此时系统需要更大的冷凝风量才能满足电子设备稳定散热的需求,但在实际情况下,冷凝风量通常有限,冷凝风量的限定范围见文中表 1,一旦冷凝风量达到额定值,在控制组件的作用下,制冷剂充注量的改变将会引起系统各部件热力性能的剧烈变化,如图 6、图 7、图 8、图 10 和图 11 中 20°C 、 25°C 、 30°C 、 35°C 和 40°C 的曲线所示。因此,为了避免相近规律的重复赘述,本文最终设定的环境温度工况为 -40°C 、 15°C 、 20°C 、 25°C 、 30°C 、 35°C 和 40°C 。

4 结果和分析

在本部分中,研究了制冷剂充注量对压缩机转速、排气特性、功耗、系统 COP 及过冷度的影响,并详细探讨了不同环境温度对最佳制冷剂充注量的影响。最后,综合压缩机功耗、排气温度、排气压力和系统 COP 提出了一种基于过冷度稳定段作为评价标准的最佳制冷剂充注量确定方法。

4.1 制冷剂充注量对压缩机转速的影响

图 6 展示了压缩机转速随制冷剂充注量变化的趋势。从图中可以观察到,随着制冷剂充注量的增加,各环境温度下,压缩机转速均逐渐减小。其原因在于,当制冷剂充注量过低时,控制组件会提高压缩机的转速,以加快流经蒸发器的制冷剂流速,从而满足电子设备的额定散热需求。随着制冷剂充注量的持续增加,蒸发器内参与换热的制冷剂数量逐步上升。在相同的制冷量条件下,控制单元介入使得压缩机的转速降低,以减少蒸发器内制冷剂的流速。

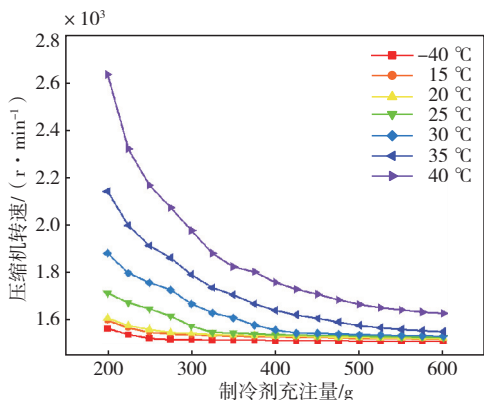


图 6 制冷剂充注量对压缩机转速的影响

Fig. 6 Change of compressor speed with refrigerant charge

同时,可以观察到,环境温度对压缩机转速的影响主要体现在压缩机转速大小的变化上,在相同的制冷剂充注量条件下,环境温度越高,压缩机转速越大。

4.2 制冷剂充注量对压缩机排气特性的影响

图 7 和图 8 分别给出了不同环境温度下压缩机排气温度和排气压力随着制冷剂充注量的变化趋势。随着系统中制冷剂充注量的逐渐增加,压缩机排气温度和排气压力均呈现出先减小后增大的趋势。其原因在于,当制冷剂充注量不足时,为维持额定制冷量,控制单元会提高压缩机转速,从而加快流经蒸发器的制冷剂流速。这将导致压缩机功耗增加,进而使得排气温度和排气压力上升。随着系统内制冷剂充注量持续增加,参与换热的制冷剂数量增多,使得压缩机转速下降、功耗降低,这将导致排气温度和压力下降。当加入过量的制冷剂时,压缩机转速会持续下降,排气温度和排气压力则快速上升。主要原因在于充入过量制冷剂后,制冷剂流量的增加将导致整个冷凝器沿程阻力显著增大。同时,由于制冷剂处于两相流状态,其流动阻力具有明显差异性,从而进一步引起冷凝器出口压力的升高。在此情况下,为维持系统的正常运行,压缩机需消耗更多的压缩功,造成能耗上升。

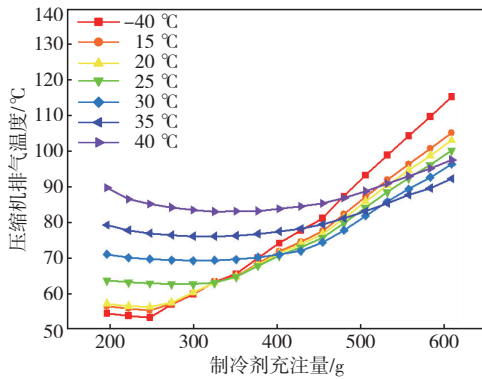


图 7 制冷剂充注量对压缩机排气温度的影响

Fig. 7 Change of compressor discharge temperature with refrigerant charge

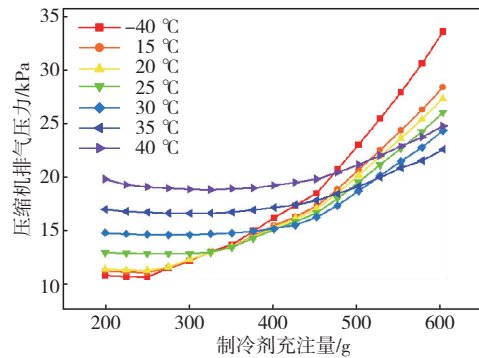


图 8 制冷剂充注量对压缩机排气压力的影响

Fig. 8 Change of compressor discharge pressure with refrigerant charge

与压缩机转速下降节省的功相比,由于冷凝器出口制冷剂压力增大而消耗的功要大得多。功耗的增加导致压缩机排气温度和排气压力再次上升。

同时,可以观察到,尽管在各环境温度下压缩机排气温度和排气压力随着制冷剂充注量的增加均呈现出先减小后增大的趋势,但不同环境温度下,压缩机的排气温度和排气压力变化速率并不相同,尤其是在制冷剂充注量超过 400 g 时,这一现象更加明显。这主要是由于热力膨胀阀开度的差异所致。如图 9 所示,在相同制冷剂充注量条件下,环境温度越低,膨胀阀的开度越小,从而导致压缩机排气温度和排气压力变化更为剧烈。

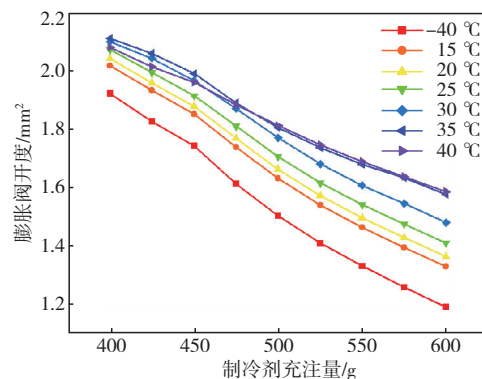


图 9 制冷剂充注量对膨胀阀开度的影响

Fig. 9 Change of the opening of expansion valve with refrigerant charge

4.3 制冷剂充注量对压缩机功耗和 COP 的影响

飞机中的蒸发制冷系统是重要的耗电组件之一,而制冷剂充注量直接影响压缩机功耗及蒸发制冷系统整体 COP 的变化,因此寻求合适的制冷剂充注量尤为重要。当制冷剂充注量不足时,蒸发制冷系统中压缩机功耗增加,系统 COP 降低;而当制冷剂过充时,压缩机功耗同样增加,导致系统 COP 下降。如图 10 和图 11 所示,随着制冷剂充注量逐渐增加,不同环境温度下的压缩机功耗与 COP 均表现出相似的性能趋势。

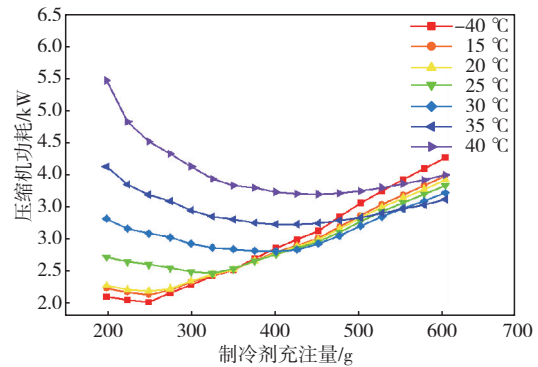


图 10 制冷剂充注量对压缩机功耗的影响

Fig. 10 Change of compressor power consumption with refrigerant charge

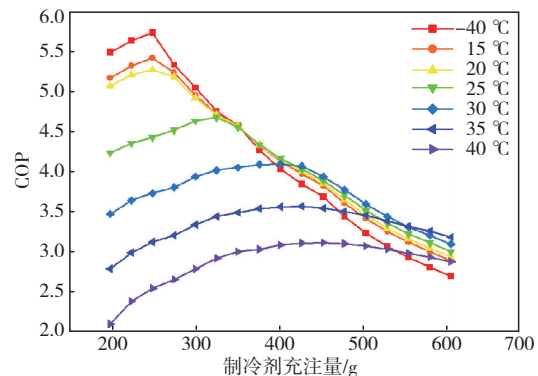


图 11 制冷剂充注量对系统整体 COP 的影响

Fig. 11 Change of the COP with refrigerant charge

最初,由于系统中制冷剂不足,在相同制冷量的情况下,压缩机功耗较大,导致系统 COP 较小。随着制冷剂充注量逐渐增多,蒸发器内的制冷剂液体逐渐增多,两相换热段长度延长且过热段缩短,如图 12 所示,从而增强了换热能力。在控制组件作用下,此时压缩机转速下降、功耗降低,使得 COP 逐渐上升至最大值。如果继续增加充注量,则会导致压缩机功耗上升,并使得系统 COP 开始减小。这是由于过量的制冷剂聚集在冷凝器出口处,导致出口制冷剂压力增大,压缩机继续向冷凝器输送制冷剂时,功耗会不断地增加,从而致使整个系统 COP 降低。

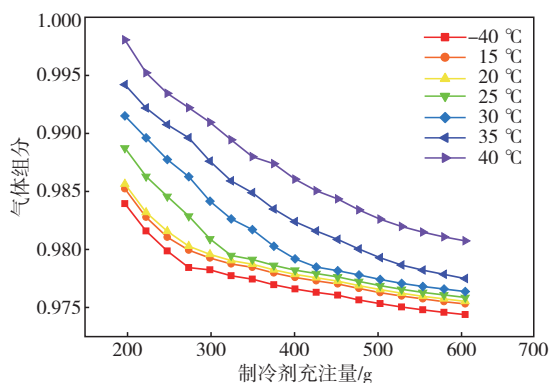


图 12 蒸发器两相区气体组分随制冷剂充注量的变化趋势
Fig. 12 Variation trend of gas composition in the evaporator two-phase region with refrigerant charge amount

根据上述分析,当制冷剂充注量不足时,压缩机会提高转速,以满足制冷系统对电子设备稳定散热的需求,这将导致压缩机功耗增加,从而降低系统的 COP。随着制冷剂充注量的增加,压缩机功耗逐渐减小,而系统 COP 则持续增长直至达到最大值。若继续增加充注量,尽管压缩机转速有所下降,但这会导致冷凝器出口处的压力过高。与因转速下降所节省的功相比,高制冷剂压力下压缩机消耗的功率更多,因此最终导致系统 COP 降低。

同时,可以观察到,在不同环境温度条件下,压缩机的最低功耗和系统最大性能系数(COP)对应的制冷剂充注量存在显著差异。随着环境温度的升高,压缩机的最低功耗和系统最大 COP 所对应的最佳制冷剂充注量均呈现出增加趋势。当外界环境温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,压缩机最低功耗及系统最大 COP 所对应的制冷剂充注量为 250 g ;而当环境温度上升至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,这一值增至 475 g 。

值得注意的是,在一维分析方法中,制冷剂的气液两相状态对蒸发器性能的影响,主要体现在蒸发器内两相流区域长度的变化上,且随着制冷剂充注量的增加,该区域的长度相应增长。然而,受限于一维分析方法本身的解析能力,对于气液两相状态如何具体影响蒸发器效率,仍难以进行深入揭示,后续可结合三维数值模拟方法,对其开展更加精细的研究。

4.4 制冷剂充注量对过冷度的影响

过冷度是指冷凝器出口处制冷剂的温度与其相应压力下饱和温度的差值。合理的过冷度是评价制冷系统制冷剂充注量是否合适的一个重要指标。冷凝器出口处的制冷剂若不是过冷状态,则在管路中稍有压力损失时,两相冷媒中的液体部分可能会出现“闪发”现象,导致最终到达蒸发器的两相冷媒干度增加、液相成分减少,从而降低制冷效果;而冷凝器出口过冷度过大,则会导致系统结霜阻塞,进而影

响制冷系统的效率。

图 13 是制冷剂充注量在不同的环境温度下对冷凝器出口过冷度的影响。起初,系统中仅有少量制冷剂时,各环境温度对应的冷凝器出口处还没有过冷度,此时的制冷剂处于气液两相状态。随着制冷剂充注量的逐渐增加,各环境温度对应的冷凝器出口处陆续出现少量的过冷度,此时进入蒸发器的制冷剂蒸发潜热能力低,制冷性能较差。当继续增加制冷剂充注量至 $350\sim 375\text{ g}$ 时,可以观察到各环境温度对应的冷凝器出口过冷度均达到了一个稳定状态。在此阶段蒸发器的有效换热面积已经得到充分利用,增加的制冷剂充注量,主要储存在储液瓶中。进一步增加充注量将导致过冷度迅速增大。这是由于进一步增加制冷剂,会超出储液瓶的容量,导致冷凝器出口制冷剂的压力增大,从而使得过冷度变大。

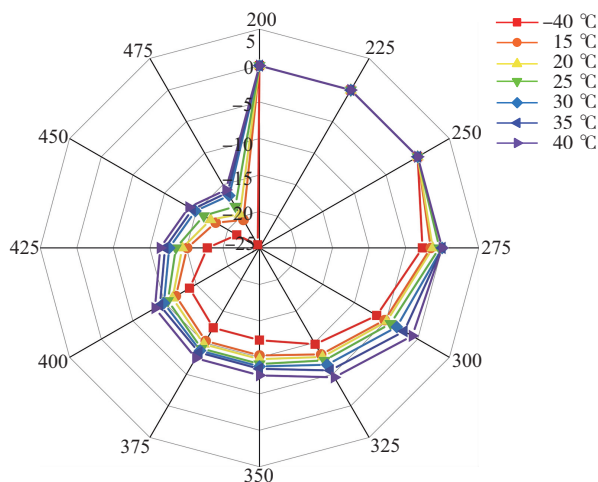


图 13 制冷剂充注量对过冷度的影响

Fig. 13 Change of subcooling degree with refrigerant charge

通过图 13 可以发现,当过冷度达到稳定时,制冷剂充注量的范围并不随环境温度的变化而发生改变,其稳定段仅与制冷剂充注量相关。

4.5 最佳制冷剂充注量评估

制冷系统在确定其最佳制冷剂充注量时,大多数研究通过寻找能够使 COP 达到最大的充注量作为系统最佳的制冷剂充注量。

根据上文分析可知,压缩机最小功耗和系统最大 COP 对应的制冷剂充注量受环境温度影响较大。在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,压缩机最小功耗和系统最大 COP 对应的制冷剂充注量为 250 g ,而 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下,这一值则是 475 g 。单一环境温度对应的最佳制冷剂充注量,难以确保其他温度下系统的高性能运转。因此,在寻找系统最佳制冷剂充注量时,需要引入新的评估指标。

过冷度达到稳定时对应的制冷剂充注量,其值

为 350~375 g,在不同环境温度下均保持相同的值,成为一个较为有效的评估指标。然而,该区间是否可以作为系统最佳制冷剂充注量,还需进一步评估该区间下系统综合性能的表现。

从图 7、图 8 和图 10 可以观察到,当制冷剂充注量处于 350~375 g 区间时,在环境温度高于 20 ℃ 的条件下,压缩机功耗、排气温度及排气压力的运行性能均接近各自工况下的最优水平,且其最大偏差控制在 20% 以内;而在环境温度介于 -40~20 ℃ 之间时,其性能偏差仍能控制在 25% 以内,展现出良好的稳定性和适应性。

从图 11 可以观察到,制冷剂充注量在 350~375 g 时,系统的 COP 在环境温度高于 20 ℃ 时,能在不同电子设备热负荷下达到各自工况下最大 COP 的 80% 以上;而在环境温度处于 -40~20 ℃ 范围内,系统的 COP 也能维持各自工况最大 COP 的 75% 以上,这表明在该充注量范围内系统整体性能表现较为优异,具有良好的能效适配能力。

以上现象表明,以过冷度达到稳定状态时对应的制冷剂充注量作为飞机蒸发制冷系统的最佳充注量,表现出了较好的性能。

5 结论

本文针对飞机蒸发制冷系统的最佳制冷剂充注量展开研究,建立了相应的仿真模型,并通过实验验证了冷凝器和蒸发器的性能,以确保模型的可靠性。在此基础上,分析了制冷剂充注量对系统特性的影响。与此同时,结合飞机工作环境的复杂性与多变性,进一步探讨了环境温度对最佳制冷剂充注量的影响。主要结论如下:

1)建立了飞机蒸发制冷系统的一维仿真模型,并对系统关键部件进行了校核研究,结果表明,经过校核的冷凝器和蒸发器与实验数据的误差不超过 10%,满足工程应用的需求。

2)分析了制冷剂充注量对飞机蒸发制冷系统性能的影响。结果表明,制冷剂过充和欠充均会导致压缩机功耗增加、排气温度和压力上升、系统 COP 降低;存在一个最佳制冷剂充注量,使得系统 COP 达到最大。

3)分析了环境温度对最佳制冷剂充注量的影响。结果表明,在不同环境温度下,压缩机的最小功耗和系统最大 COP 对应的最佳制冷剂充注量存在显著差异,并且随着环境温度的升高,最佳制冷剂充注量也随之增加。

4)过冷度是评估飞机蒸发制冷系统最佳制冷剂

充注量的关键指标。其稳定段不受环境温度的影响,仅与制冷剂的充注量相关。当把过冷度达到稳定状态时所对应的制冷剂充注量作为系统的最佳制冷剂充注量时,压缩机功耗、排气温度、排气压力和系统 COP 在各种工况下,均能保持良好的性能。

参考文献

- [1] 毛晓东,张策,王鹤翔,等.直升机核生化防护体系集成设计与仿真[J].空军工程大学学报,2024,25(1):17-24.
MAO X D,ZHANG C,WANG H X,et al. Integrated Design and Simulation of Helicopter NBC Protection System[J]. Journal of Air Force Engineering University,2024,25(1):17-24. (in Chinese)
- [2] 黄雪聪.民用直升机设计更改审定基础的确定方法研究[J].科技创新与应用,2024,14(28):161-165,170.
HUANG X C. Research on Determination Methods for Certification Basis of Design Changes in Civil Helicopters[J]. Science and Technology Innovation and Application,2024,14(28):161-165,170. (in Chinese)
- [3] 魏松泽.直升机救援在创伤救治中应用的有效性与可行性分析[J].今日消防,2023,8(9):24-26.
WEI S Z. Analysis of the Effectiveness and Feasibility of Helicopter Rescue in Trauma Treatment[J]. Today Firefighting,2023,8(9):24-26. (in Chinese)
- [4] 王道震,李俊玲,刘红波,等.元器件筛选等级与直升机应用等级的关系研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2024,42(2):15-19.
WANG D Z,LI J L,LIU H B,et al. Research on the Relationship Between Component Screening Levels and Helicopter Application Levels[J]. Reliability of Electronic Products and Environmental Testing,2024,42(2):15-19. (in Chinese)
- [5] 彭孝天,王苏明,王晨臣,等.直升机环境控制系统应用现状分析[J].海军航空工程学院学报,2018,33(2):225-230.
PENG X T,WANG S M,WANG C C,et al. Analysis of the Current Application Status of Helicopter Environmental Control Systems [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical Engineering Institute,2018,33(2):225-230. (in Chinese)
- [6] 史素清,路高社,梁双,等.飞机空气循环制冷系统控制仿真简析[J].科技传播,2018,10(4):117-118.
SHI S Q,LU G S,LIANG S,et al. Analysis of Control Simulation for Aircraft Air Cycle Cooling System [J]. Science and Technology Communication,2018,10(4):117-118. (in Chinese)
- [7] 张馨弘.蒸发制冷系统在直升机上的应用现状及前景[J].中国科技纵横,2022(7):89-92.
ZHANG X H. The Current Status and Prospects of

- Evaporative Cooling Systems in Helicopters[J]. China Science and Technology Horizon, 2022(7): 89-92. (in Chinese)
- [8] 王泽嵩,刘金平,周易,等. 泵驱动的制冷剂相变冷板冷却系统实验研究[J]. 制冷学报, 2024, 45(1): 36-45. WANG Z S, LIU J P, ZHOU Y, et al. Experimental Study on Pump-Driven Refrigerant Two-Phase Cold-plate Cooling System[J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(1): 36-45. (in Chinese)
- [9] 何予东,张毅,李志刚. 某型蒸发循环制冷系统分析与研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020(6): 83-85. HE Y D, ZHANG Y, LI Z G. Analysis and Research on a Certain Type of Evaporative Cycle Refrigeration System[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020(6): 83-85. (in Chinese)
- [10] 范俊,庞丽萍,刘道锦,等. 直升机液冷/蒸发制冷联合系统关键部件试验性能[J]. 化工学报, 2020, 71(增刊2): 80-84. FAN J, PANG L P, LIU D J, et al. Experimental Performance of Key Components of Helicopter Liquid Cooling/Evaporative Refrigeration Combined System[J]. CIESC Journal, 2020, 71(S2): 80-84. (in Chinese)
- [11] KIM D H, PARK H S, KIM M S. The Effect of the Refrigerant Charge Amount on Single and Cascade Cycle Heat Pump Systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 40: 254-268.
- [12] 王从飞,贾凡,殷翔,等. 电动车跨临界 CO₂ 热系统充注定量需求规律及非适充系统失稳特性[J]. 制冷学报, 2024, 45(4): 59-67. WANG C F, JIA F, YIN X, et al. Charging Requirements and Unstable Characteristics of Automotive CO₂ Thermal Management Systems[J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(4): 59-67. (in Chinese)
- [13] 赵晓丹,张超,苏之勇. 冷藏车制冷系统最佳充注量的实验研究[J]. 低温与超导, 2024, 52(9): 78-83. ZHAO X D, ZHANG C, SU Z Y. Experimental Study on the Optimal Charging Amount of Refrigeration System for Refrigerated Trucks[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2024, 52(9): 78-83. (in Chinese)
- [14] 杜长明,田长安,庞学博,等. 跨临界 CO₂ 热泵空调系统冷媒充注量研究[J]. 铁道机车与动车, 2024(5): 9-11. DU C M, TIAN C A, PANG X B, et al. Research on Refrigerant Charge Amount in Transcritical CO₂ Heat Pump Air Conditioning Systems[J]. Railway Locomotive and EMU, 2024(5): 9-11. (in Chinese)
- [15] ADELEKAN D S, OHUNAKIN O S, OLADEINDE M H, et al. Performance of a Domestic Refrigerator in Varying Ambient Temperatures, Concentrations of TiO₂ Nanolubricants and R600a Refrigerant Charges[J]. Heliyon, 2021, 7(2): e06156.
- [16] YIN X, WANG A C, FANG J M, et al. Coupled Effect of Operation Conditions and Refrigerant Charge on the Performance of a Transcritical CO₂ Automotive Air Conditioning System[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 123: 72-80.
- [17] LI Z H, JIANG H Y, CHEN X W, et al. Optimal Refrigerant Charge and Energy Efficiency of an Oil-Free Refrigeration System Using R134a[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 164: 114473.
- [18] KONG X Q, YAN X Z, YUE Z W, et al. Influence of Refrigerant Charge and Condenser Area on Direct-Expansion Solar-Assisted Heat Pump System for Radiant Floor Heating[J]. Solar Energy, 2022, 247: 499-509.
- [19] 陈小砖,孟雪峰,王攀,等. 电动汽车二次回路热泵空调系统性能试验研究[J]. 制冷与空调, 2022, 22(9): 70-79. CHEN X Z, MENG X F, WANG P, et al. Experimental Investigation on Performance of Secondary Loop Heat Pump Air Condition System for Electric Vehicles[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2022, 22(9): 70-79. (in Chinese)
- [20] PANG L P, MA D S, LUO K, et al. Performance of an Integrated Thermal Management System for Helicopter[J]. Energy, 2022, 239: 122292.
- [21] KANG Y J, HU Y P, ZHANG C H, et al. Experimental Study on Charge Amount of Low-GWP Refrigerants in Electric Vehicle Thermal Management System[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 256: 124059.
- [22] LEE J H, KIM J H, HEO I Y, et al. Optimal Charge Amount for Semiconductor Chiller Applying Eco-Friendly Refrigerant R-744[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 59: 104461.
- [23] ZHAO M, PANG L P, LIU M, et al. Control Strategy for Helicopter Thermal Management System Based on Liquid Cooling and Vapor Compression Refrigeration[J]. Energies, 2020, 13(9): 2177.

(编辑:陈斐)