

翻转角度对雷达阵面翻转式插箱空调热管理影响的实验研究

贾凡¹, 常纪平², 邓文川³, 殷翔³, 曹锋^{1,3}, 杨旭³

(1. 西安交通大学国家储能产教融合创新平台(中心), 710049, 西安; 2. 中天(江苏)防务装备有限公司, 225400, 江苏泰兴; 3. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了保证雷达天线阵面工作过程重力翻转角度变化时热管理系统仍可有效工作, 搭建了可翻转蒸汽压缩热管理实验台架, 通过模拟雷达天线阵面工作过程, 实验研究了翻转式插箱空调的动态运行特性, 确定了整机不同翻转角度下系统性能的变化规律, 分析了制冷剂动态分布及其对电子设备热管理的影响。结果表明: 空调系统在翻转条件下仍有较高的可靠性, 相较于不翻转, 翻转工况下空调系统性能略有下降但可平稳运行; 前、后翻转 90°制冷量下降幅度最高分别为 0.29%、6.48%, 性能系数下降幅度最高分别为 4.11%、6.02%。此外, 制冷剂分布有强重力相关性, 前、后翻转 90°会导致蒸发器制冷剂分布不均, 左、右翻转 90°对蒸发器制冷剂分布无显著影响。研究结果可为雷达阵面插箱空调的设计应用提供理论和实践参考。

关键词: 蒸汽压缩; 雷达阵面冷却; 翻转角度; 重力相关性

中图分类号: TB61 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202505010 **文章编号:** 0253-987X(2025)05-0097-10

Experimental Study of the Effect of Tilt Angle on the Thermal Management of Radar Array Flip-Flop Plug-in Box Air Conditioners

JIA Fan¹, CHANG Jiping², DENG Wenchuan³, YIN Xiang³, CAO Feng^{1,3}, YANG Xu³

(1. National Innovation Platform (Center) for Industry-Education Integration of Energy Storage Technology, Xi'an 710049, China; 2. Zhongtian (Jiangsu) Defence Equipment Co., Ltd., Taixing, Jiangsu 225400, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To ensure that the thermal management system functions effectively during changes in gravitational flipping angle during the work process of the radar antenna array, a rotatable plug-in box-type air conditioning experimental rig is developed. Through the simulation of the working process of the radar antenna array, the dynamic operating characteristics of the rotatable plug-in box-type air conditioners are analyzed. Variations in system performance under different tilt angles are determined, and the dynamic distribution of refrigerant and its impact on electronic device thermal management is investigated. The results demonstrated that the air conditioning system remains highly reliable under tilted conditions. Compared to the non-tilted state, the system showed minor performance decreases but maintained stable operation under the flipping working condition. The maximum reductions in cooling capacity for forward and backward tilts of

90° were 0.29% and 6.48%, respectively, while the maximum reductions in the coefficient of performance were 4.11% and 6.02%, respectively. Furthermore, the refrigerant distribution is highly affected by gravity; forward and backward tilts of 90° resulted in uneven refrigerant distribution within the evaporator, whereas left and right tilts of 90° had negligible effects. These findings offer theoretical and practical reference for the design and application of plug-in box-type air conditioning systems for radar arrays.

Keywords: vapor compression; radar array cooling; flipping angle; gravitational dependence

作为现代电子信息技术的发展基石,电子设备在大数据、量子通信等变革性技术推动的第四次工业革命中扮演着至关重要的角色^[1]。电子设备支撑着生产、交通、医疗等各个领域,也广泛应用于军事与数字产业。技术的不断发展,对电子设备的尺寸、性能要求越来越高。小型化、集成化会使电子设备内部热流密度大幅增加,其中传统集成电路热通量为 100 W/cm²,超大规模集成电路热通量可达 10³~10⁴ W/cm²^[2-3]。若不能进行有效热管理,会造成电子器件的温度急剧上升,寿命与可靠性大幅降低^[4]。造成电子故障的主要原因有高温、潮湿、振动和灰尘等^[5],相关研究表明电子设备温度每上升 10~15℃,其使用寿命将缩短 50%^[6]。55%左右的电子故障是由热管理问题引起的^[7]。可见,采用合适的热管理系统对电子器件的可靠与稳定运行至关重要。

当前电子设备热管理方式较多,主要包括空气自然冷却、空气强制冷却^[8]、液体强制对流冷却^[9-10]、液体沸腾冷却^[11-13]、热电冷却^[14-16]及热管冷却等^[17-19]。作为目前成熟且应用最广泛的蒸汽压缩制冷技术,相较于热电冷却、吸收式冷却等方案稳定高效,布局灵活,成本较低,在电子设备热管理领域有广阔的应用前景^[20-21]。

许多电子设备的冷却系统在复杂工况下存在特殊需求。例如,在翻转式空调的应用中,系统运行过程中空调角度会随外界环境发生变化。这种空调系统在常规应用场景中较为少见,主要集中在航空航天领域,主要原因在于航天器运行过程中加速度可能超过重力,甚至在太空中处于微重力状态。在这种环境下,传统的重力相关冷却系统难以正常运行,热管理系统的设计与运行受到极大挑战。现有的热管理系统大多有固定的安装方向且在固定重力条件下工作。当安装角度或重力方向发生显著改变时,这类系统可能会出现冷却液流动不均、散热不稳定等问题。为此,翻转式插箱空调系统应运而生,其通过模块化和设计轻量化来提高系统在不同角度下的适应性,以保持稳定的冷却效果。

目前,翻转式空调系统在航空航天领域已有初步研究。相关学者主要研究不同重力条件下的热管理系统如何运行,重点关注航天器在加速度超过重力或微重力环境下的散热效果^[22-24]。例如, Madhusudhan 等^[25]探讨了微重力条件下的温度分布,揭示了高效热管理对复杂工况的重要性。Effendi 等^[26]分析了 ATR 72-500 飞机空调系统在不同工况下的冷却负荷差异,为动态环境下的热管理设计提供了重要依据。此外, Prasaditya 等^[27]研究了飞机空调热交换器的积污问题,并提出通过清洁积污提高散热性能的解决方案。

然而,翻转式空调系统在地面条件下的研究尚少见公开文献,现有文献几乎未涉及地面重力环境下的动态冷却需求。对雷达天线阵面的热管理系统而言,其工况更为复杂。由于雷达天线阵面在工作过程中会随操作需求而不断调整角度,因此热管理系统需要在各种翻转角度下维持高效冷却。当前的固定角度冷却系统难以满足这一要求。此外,雷达系统对设备的质量和模块化设计要求极高,冷却系统必须轻量化且模块化,以保证在不同角度下能快速调整、安装和维修。这种特殊需求使得对地面重力相关性热管理系统的研究具有重要的实际意义。

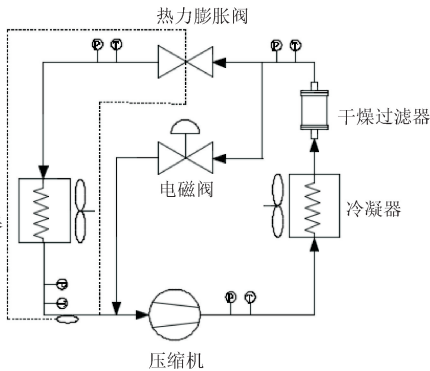
针对雷达天线阵面热管理需求,设计并搭建了基于微油卧式涡旋压缩机的翻转空调箱系统与测试平台,通过实验揭示翻转角度变化时系统运行特性变化规律及影响机理。验证系统在不同翻转角度下启动的动态特性和运行平稳性,分析不同翻转方向对制冷剂分布及制冷性能系数(COP)的差异化影响规律。研究聚焦固定风量条件下系统动态启动特性与稳态性能的关联机制。通过实验明确了特定条件下的系统特性变化规律,为雷达天线阵面等设备在实际工业应用中的角度变化工况提供初步理论依据与实验支持。

1 实验装置

1.1 实验台架

实验使用的翻转式空调系统原理图如图 1(a)

所示,其主要部件为压缩机、冷凝器、热力膨胀阀、蒸发器、干燥过滤器及电磁阀。工质为 R134a 制冷剂。制冷剂经过压缩机压缩后进入冷凝器散热,状态变为高温低压。而后经过干燥过滤器后使用热力膨胀阀进行节流。阀后低温低压的两相制冷剂经过蒸发器冷却空气,而后进入压缩机低压侧,完成循环。压缩机吸气口与干燥过滤器出口通过电磁阀连通,可使排气温度过高时冷凝器出口制冷剂直接通过电磁阀喷入吸气管路。高压制冷剂与蒸发器出口制冷剂混合后提高吸气压力,减小压缩机排气温度。该电磁阀控制逻辑为排气温度高于 95℃时开启,小于 90℃时关闭。实验测试的翻转式空调系统实物如图 1(b)所示。翻转式空调系统技术指标如表 1 所示。



(a)系统原理图



(b)实验测试台

图 1 翻转式插箱空调实验台

表 1 翻转式空调系统技术指标

Table 1 Technical specifications of the flip-type air-conditioning system

参数	数值
制冷量/kW	1.5
环境温度/℃	0~62
送风风量/(m ³ ·h ⁻¹)	≥550
翻转角度/(°)	80

压缩机、换热器等部件均通过系统目标要求设计

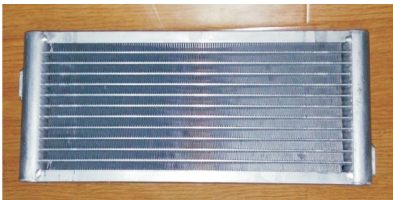
并与制造商共同开发确定。各部件具体参数如表 2 所示。

表 2 翻转空调箱系统部件的参数

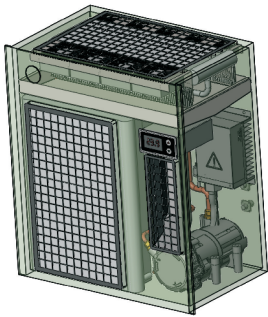
Table 2 Parameters of the flip-over air-conditioning box system components

部件	参数或型号	数值
压缩机	排量/cm ³	18
	额定转速/(r·min ⁻¹)	3 300
	额定功率/W	800
	最大排压/MPa	2.5
蒸发器	扁管宽度/mm	25
	扁管高度/mm	2
	微通道数	16
	扁管数	11
冷凝器	扁管宽度/mm	25
	扁管高度/mm	2
	微通道数	16
	流程 1~3 的扁管数	18、12、7
热力膨胀阀	风机风量/(m ³ ·h ⁻¹)	1095
	TEN2068Z3348(丹佛斯)	
电磁阀	安全压力/MPa	3.4
	EVR3032F8107(丹佛斯)	
干燥过滤器	电压/V	24
	ALCO	

考虑到翻转的需求,压缩机翻转时会导致有油池压缩机缺油,使润滑失效,这里采用微油涡旋压缩机,不设油池。设计蒸发器时,考虑到空间、换热效率与充注量等问题,采用微通道换热器,实物如图 2(a)所示。整个空调箱三维设计如图 2(b)所示。为了准确控制实验中的翻转角度,实验台架采用量角器进行角度的初步确定。具体步骤如下:首先,使用量角器在实验台架上精确测量所需的倾斜角度;然后,通过机械固定装置将空调箱固定在设定的角度,确保在实验过程中角度保持不变。实验台架的翻转角度控制方式主要依赖于手动调节和机械锁定,确保角度设置的精度在±0.5°以内。倾角控制方式不仅简化了实验设备的结构,还保证了实验数据的可靠性和重复性。



(a)蒸发器实物图



(b)空调箱三维设计图

图 2 插箱空调部件选型设计

Fig. 2 Design and selection of air-conditioning components for plug-in boxes

对于热管理插箱空调,在不同热负荷下有必要对插箱空调进行调整以适应工况。热负荷分布对被冷却器件较重要,但与风量分配等相关,与本文插箱空调研究相关性不大,未进行进一步研究。

1.2 实验工况

为了探究系统运行的可行性与翻转倾角对翻转式空调性能的影响,基于 1.1 节所述的系统进行了测试。首先,在环境温度 25℃,热负荷 1 400 W 下验证系统是否能正常稳定工作。然后,在环境温度 25℃下对不同翻转角度时系统运行特性进行研究。具体实验工况如表 3 所示。

表 3 实验工况

Table 3 Experimental conditions

参数	数值
环境温度/℃	20,25,30,35
翻转角度/(°)	前后:15,30,45,90
	左右:90,90
热负荷/W	600,900,1 200,1 400

在本研究中,参考额定工作条件的翻转角度为 80°,设置翻转角度范围为 0°~90°,并以 15°为间隔选择了 0°、15°、30°和 45°共 4 个翻转角度进行实验。选择 15°的角度间隔主要基于以下考虑:首先,15°的间隔能够有效区分不同翻转角度对系统冷却性能和运行稳定性的影响;其次,较小的角度间隔可能由于测试不确定度导致趋势分析偏差,并增加结果处理的难度。通过采用 15°的间隔,在保证实验覆盖全面性的同时,简化了实验操作和数据分析。此外,为了明确不同倾斜方向对制冷剂分布的影响,还在 90°翻转角度下进行了额外的实验分析。这种角度

选择策略确保了实验数据的代表性和可靠性,同时保持了实验过程的简洁与高效。鉴于地面重力环境下翻转式空调系统的相关标准和研究较少,主要基于研究经验和对实际运行环境的全面覆盖来确定实验条件。选取反映雷达天线阵面在不同工作条件下的典型环境温度,以确保实验能真实模拟实际热管理需求。采用额定工况下的风速进行实验,反映了系统在实际运行中最常见和关键的工作状态。此方法确保实验工况全面覆盖雷达天线阵面可能面临的主要运行环境,以提升实验结果的适用性和可靠性。

1.3 理论与误差分析

在实验测试中,有必要根据测试温度和流速等数据计算制冷量 Q_a 、性能系数(η)等,以便更好地分析翻转空调的特性。

制冷量 Q_a 的计算公式如下

$$Q_a = \rho_a \dot{V}_a c_{p,a} (T_{a,i} - T_{a,o}) \tag{1}$$

式中: ρ_a 为空气的密度; $\dot{V}_a$ 为空气的体积流量; $c_{p,a}$ 为空气的比定压热容; $T_{a,i}$ 、 $T_{a,o}$ 分别为空气入口和出口温度。

系统循环的性能系数(η)计算公式如下

$$\eta = Q_a / W \tag{2}$$

式中: W 为压缩机的功耗。

使用精度较高的 PT100 热电阻测量进出风、进出水温度。对于制冷剂各状态点温度使用精度稍低的 T 型热电偶测量。制冷剂各状态点压力使用 PT 传感器进行测量。电加热、压缩机的功率使用高精度测功仪进行测量。实验所用测量设备具体信息如表 4 所示。

表 4 测量仪器的详细参数

Table 4 Detailed parameters of the measuring instrument

仪器	参数	量程	不确定度
T 型热电偶	温度	-50~150℃	±0.5℃
压力变送器	压力	0~3.8 MPa	±0.5%
WT500 功率计	功率	15~1 000 V, 0.05~40 A	±0.1%

根据表中各仪器的测量精度及变量的计算方式可得出其相对误差。不确定度的计算公式如下

$$\omega_f = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \omega_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \omega_2 \right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \omega_n \right)^2 \right]^{1/2} \tag{3}$$

式中: x 为待测参数; f 为计算值。

根据式(3)可计算系统 Q 与 η 的相对误差,具体计算方法如下

$$\frac{\omega_Q}{Q} = \left[\left(\frac{\omega_\rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\omega_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\omega_{c_p}}{c_p} \right)^2 + \frac{\omega_{T_i}^2 + \omega_{T_o}^2}{(T_i - T_o)^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\frac{\omega_\eta}{\eta} = \left[\left(\frac{\omega_Q}{Q} \right)^2 + \left(\frac{\omega_{W_{comp}}}{W_{comp}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中: W_{pump} 为压缩机功耗。

经计算, Q 与 η 的最大不确定度分别为 4.453% 和 4.454%。

2 结果与讨论

2.1 系统动态运行特性

一般来说,水平安装的压缩机运行过程中不允许出现倾倒现象。考虑到翻转式空调系统的应用需求,其运行过程中会出现 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的变化,故首先对该系统进行可靠性验证。

将环境温度控制在 25°C , 翻转角度调整为后倾 90° , 压缩机排气口高于吸气口。此时制冷剂在压缩机内的运动方向由下至上。系统动态参数如图 3 所示。可以看出,压缩机的吸气温度和排气温度均处于正常工作范围,并且在整个实验期间表现出较高的稳定性。

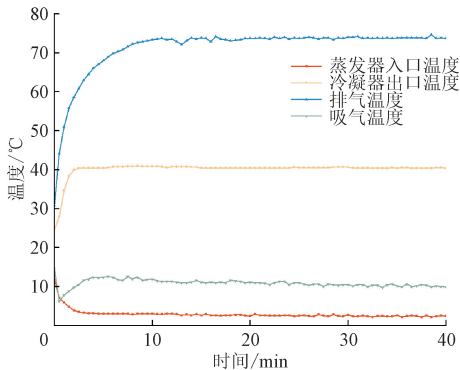


图 3 翻转空调系统热力学动态参数变化(后翻转 90°)

Fig. 3 Variation of thermodynamic dynamic parameters of the flip-flop air-conditioner system (90° backward tilt)

具体而言,压缩机启动后,其排气温度迅速升高,达到一定温度后趋于平稳,维持在 73.4°C 左右。排气温度稳定所用时间更长,大概 10 min。吸气温度呈现出先下降后上升的趋势,最终保持在约 10.8°C 。

从图 3 还可以看到,冷凝器出口温度与蒸发器入口温度随时间的变化趋势与压缩机的吸排气温度变化一致。冷凝器出口温度稳定在 40.4°C 左右,而蒸发器入口温度则维持在约 2.3°C 。这些温度参数的稳定性进一步验证了压缩机在倾斜状态下的良好

性能,表明系统可稳定运行。各个状态参数稳定所需时间由短到长依次为:蒸发器入口温度、冷凝器出口温度、吸气温度与排气温度。

图 4 展示了压缩机吸、排气压力和功耗的变化趋势。通过观察可以发现,当系统进入稳定状态后,压缩机的吸气压力和排气压力均保持在较为恒定的范围内。具体表现为排气压力为 1.2 MPa ,而吸气压力则为 0.2 MPa 。同时,压缩机的功耗也保持在 1.08 kW 左右,呈现出较高的稳定性。

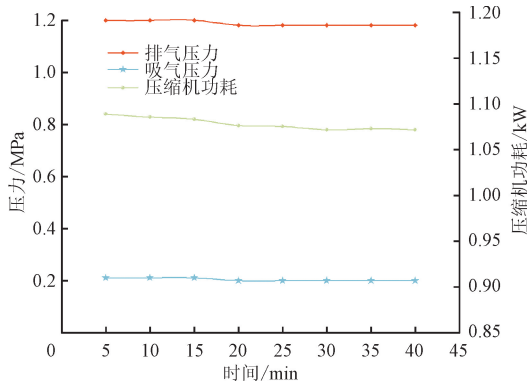


图 4 翻转空调系统动态性能变化

Fig. 4 Dynamic performance variation of flip-flop air-conditioner system

基于以上分析可看出:系统的实验运行表现符合预期,各项参数表现稳定。其主要原因在于,系统中采用的卧式涡旋压缩机没有油池或独立的回油口,润滑油随制冷剂在系统中循环流动。即使在不同翻转角度下,润滑油也不会再在压缩机排气腔内积聚,确保了系统的正常运行。

2.2 翻转角度对系统特性的影响

通过 2.1 节可知,本文研究的翻转空调系统在翻转条件下受重力作用导致制冷剂在各个部件中分布可能发生一定变化。虽然压缩机也受到一定影响,但整体运行较为平稳可靠。翻转条件对空调系统存在影响,但未见关于反转条件对空调影响规律与机理的报道。本文基于制冷剂流动、分布和性能,对不同翻转角度下系统性能与热力学参数研究。

调整翻转角度会对系统内制冷剂的分布产生影响,这势必影响换热器中制冷剂与空气的换热,从而对制冷量产生影响。如图 5 所示,当环境温度为 25°C 时,在蒸发器侧无额外热负荷的条件下,系统制冷量随翻转角度变化十分明显。当系统向前倾斜,即翻转角度在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内时,系统的制冷量呈现出明显的减小趋势。当系统向后倾斜,翻转角

度在 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间时,系统的制冷量同样减小,且减小幅度比向前倾斜时更为显著。总体而言,系统的制冷量随着翻转角度的变化逐渐减少。

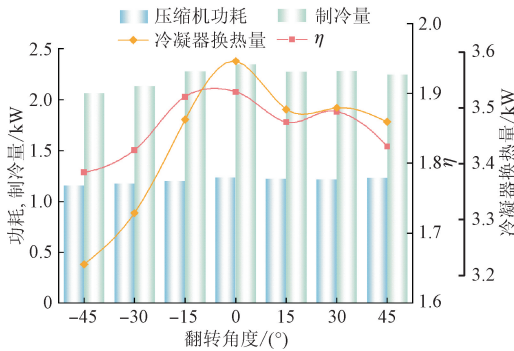


图 5 翻转角度对空调系统性能的影响

Fig. 5 Effect of operating inclination on the performance of air conditioner system

在翻转角度 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的范围内,由于当机组向前倾斜时,冷凝器风道侧排出的热空气比冷空气轻,导致部分热空气被冷凝器风机重新吸入,降低了冷凝器的换热效果,制冷剂的液体过冷度因此减小,系统的制冷量也随之下降。翻转角度在 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时,制冷量相近但冷凝器换热量有一定程度下降。此时冷凝器工况运行状态的改变是制约系统性能的最大因素。另外,由于重力的作用,蒸发器内的制冷剂分布不均匀,这也是系统制冷量随翻转角度变化而减少的另一个主要原因。可以明显看出,系统在向前倾斜时,制冷量的减少幅度小于向后倾斜时的减少幅度。这是因为系统向前倾斜时,制冷剂主要积聚在风量较大的前端风机一侧,而向后倾斜时,制冷剂更容易积聚在风量较小的后端风机一侧。因此,向前倾斜时,蒸发器侧的换热效果较好,制冷量的减小幅度小于向后倾斜。与制冷量变化相对应,压缩机功耗也在翻转角度为 0° 时取得最大值。随翻转角度增大,压缩机功耗不断减小,且前倾减小幅度相对较小。对于系统性能系数来说,其变化规律也基本相同,在翻转角度为 0° 时取得最大值,同样随翻转角度变大性能系数同步减小,但减小幅度较小,前后翻转减小幅度分别为 -4.11% 与 -6.02% ,可保证基本制冷功能的实现。

不同翻转角度下压缩机吸排气温度变化如图 6 所示。可看出,吸排气温度随翻转角度变化较小,从 $-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 排气温度缓慢上升,从 79.9°C 增大到 88.1°C 。此过程中,吸气温度先上升,在翻转角度为 0° 时取得峰值,而后缓慢下降,最终上升。

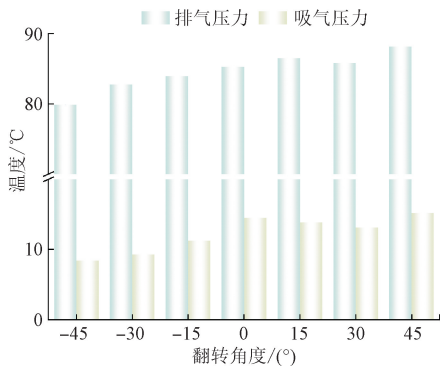


图 6 翻转角度对空调系统吸排气温度的影响

Fig. 6 Effect of flip angle on the suction and discharge temperatures of air conditioner system

为了进一步探究其原因,对不同翻转角度的压缩机吸排气压力进行分析,结果见图 7。压缩机吸气压力在翻转角度 $-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 变化过程中,先微微增大,在 0° 时取得最大值,后缓慢下降。排气压力随翻转角度变化规律与吸气压力基本相同。但在翻转角度为 45° 时,排气压力突然增大,导致吸排气温度提高。其变化规律与图 5 相对应,蒸发压力不变时,冷凝压力小导致压缩机压比变小,从而使功耗减小。

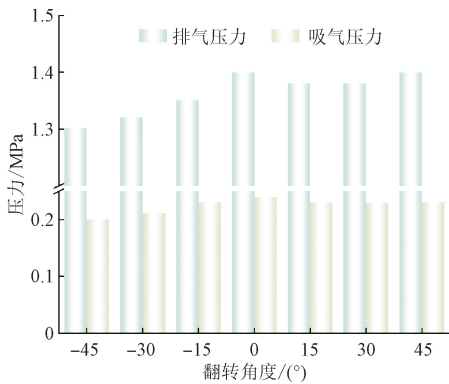


图 7 翻转角度对空调系统吸排气压力的影响

Fig. 7 Effect of flip angle on suction and discharge pressures of air conditioner system

2.3 翻转角度对制冷剂分布特性的影响

为了进一步研究翻转条件下系统状态变化原因,对不同方向 90° 翻转的系统进行了进一步实验。使用热成像仪辅助分析制冷剂在蒸发器中的分布状态。

不同方向翻转 90° 下系统关键参数如图 8 所示。可以看出,向左右翻转 90° 时,排气压力与不翻转时相同,吸气压力变化在 0.02 MPa 以内,制冷量变化

分别为 0.179 kW 和 0.184 kW。可见左右翻转对系统影响相近。前翻转 90°时,排气压力有一定降低,为 0.05 MPa,吸气压力增加 0.01 MPa,此时制冷量减少了 0.093 kW,整个系统受影响相对较小。后翻转 90°时对系统影响最大,此时排气压力大幅下降 0.22 MPa,吸气压力降低 0.04 MPa,制冷量也减少了 0.35 kW。

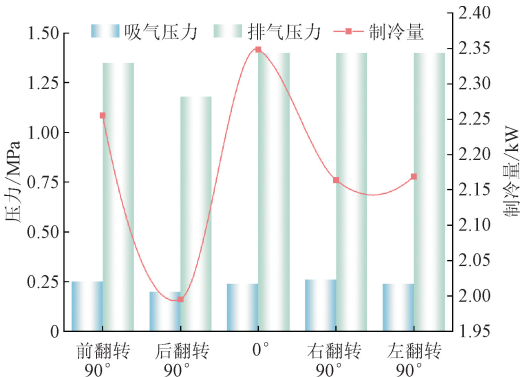


图 8 翻转角度对空调系统性能的影响

Fig. 8 Effect of operating inclination on the performance of air conditioner system

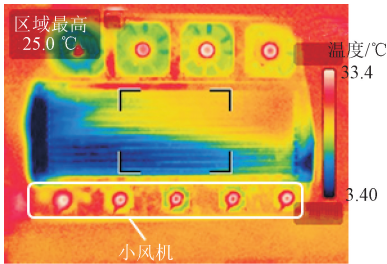
需要说明的是,本文所研究的制冷剂分布并非传统意义上因流动模式或充注量影响而产生的分布特征。在本研究中,制冷剂分布主要指不同翻转角度条件下,由重力作用引起的制冷剂在换热器内部的局部积聚。随着翻转角度的变化,重力影响了制冷剂在换热器中的分布。这种重力驱动分布特性在不同翻转角度下表现出显著差异。这种分布特性直接影响换热器的热交换效率,从而对系统整体冷却性能产生重要作用。在特定翻转角度下,重力导致的制冷剂分布在换热器中形成积聚区域,使冷却效果随翻转角度而发生变化。因此,本文研究的重点是探讨这种由于重力因素导致的制冷剂分布变化规律,而非传统的制冷剂流动模式或充注量对系统性能的影响。

由于箱体设计原因,换热器不同位置的风速不同。因此,制冷剂更多分布在高风速侧对系统性能有积极影响,分布在低风速侧有消极影响。系统翻转对性能影响的主要原因为管路及换热器中制冷剂分布导致的换热变化。不同翻转角度下蒸发器的红外成像图如同 9 所示。

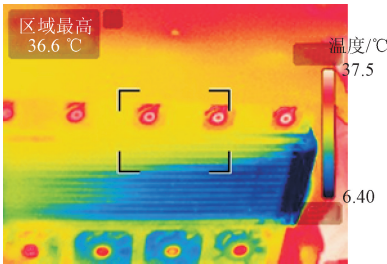
图 9(a)、(b)、(c)、(d)分别为后翻转、前翻转、右翻转及左翻转 90°时蒸发器的红外成像图。从图 8 中可看出,插箱空调前翻转与后翻转条件下系统性能相差较大,其中变化较明显的运行参数为吸气压力,后翻转时吸气压力明显较低,可推测翻转方向的

改变影响了低压蒸发器的换热情况。为了进一步分析,对比图 9(a)与(b),此时由于重力影响,制冷剂分布严重不均,而前翻转时制冷剂聚集于大风机侧,后翻转时制冷剂聚集于小风机侧,使得前翻转时换热效果较前翻转更好,制冷量也更高,导致了后翻转蒸发压力降低,性能变差。

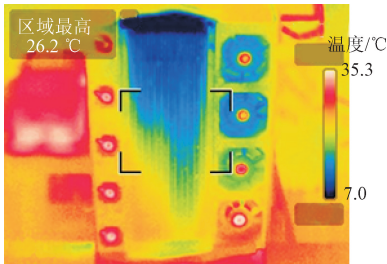
从图 9(c)、(d)可看出,左翻转与右翻转 90°条件下制冷剂受重力影响较小,制冷剂分布较为均匀,二者换热能力相差不大。但这两种条件下与不翻转系统制冷量与性能系数仍有一定差别,其主要为管路中的制冷剂分布导致的。



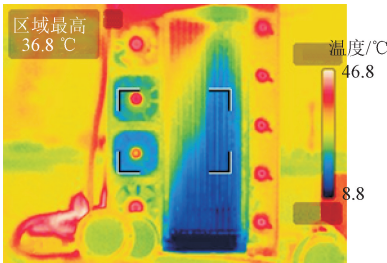
(a)后翻转 90°



(b)前翻转 90°



(c)右翻转 90°



(d)左翻转 90°

图 9 不同翻转角度下蒸发器的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of evaporator at different inclination angles

2.4 环境温度对系统性能的影响

环境温度与热负荷变化是翻转式插箱空调运行过程中的关键参数,对系统的冷量、性能系数等参数有决定性的影响。为了验证系统在不同环境温度、热负荷下的运行可靠性及具体性能参数变化,对不同温度、发热量下系统性能进行研究,结果见图10。这里在不同环境温度下保持蒸发温度为 5°C 不变。一定发热量下随着环境温度增加,系统制冷量不断减小,压缩机功耗增大, η 不断降低。其主要原因是温度升高导致冷凝温度、压力上升,增大了压比,使压缩机功耗增加,同时降低了阀前制冷剂焓,使制冷量降低。压比增加还会引起排气温度的上升。R134a的临界温度为 101.1°C ,过高的温度会导致润滑油失效。本系统中温度过高时会打开电磁阀对吸气端喷液,降低压缩机排气温度。

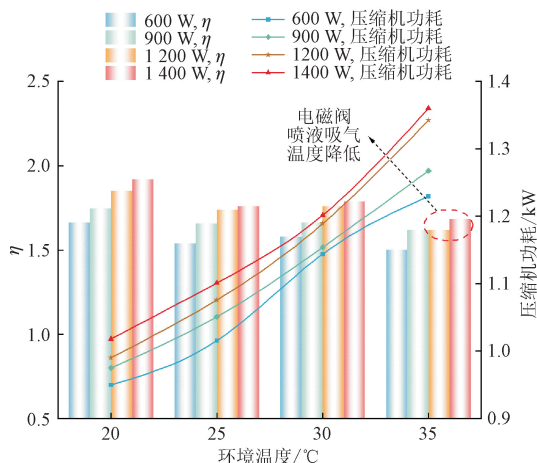


图10 环境温度、发热量对系统性能的影响

Fig. 10 Effect of ambient temperature and heat generation on system performance

热负荷变化在实验中主要通过蒸发器侧保温箱内的电加热实现。环境温度相同时,热负荷越大系统的制冷量也越大。其主要原因为,在翻转空调系统中,冷凝温度由环境温度决定,在一定工况下可认为不变。热负荷增大提高了保温箱温度,使蒸发压力上升,蒸发压力的提高同时也提高了吸气密度,综合作用下制冷量与 η 均有一定程度的提升。综上,在不同环境温度、热负荷下系统均可按照设计预期平稳运行。

3 结 论

(1)验证了微油卧式涡旋压缩机的适用性,该压

缩机能够满足翻转插箱空调的工业需求。在不同环境温度 and 热负荷下的翻转工况中,系统均可稳定运行,表现出较高的可靠性和稳定性。

(2)实验发现,系统在 $0^{\circ}\sim\pm 45^{\circ}$ 翻转过程中,制冷量和 η 均随翻转角度增加而下降:前倾时制冷量和 η 的最大下降幅度分别为 0.29% 和 4.11% ;而后倾时最大下降幅度分别为 6.48% 和 6.02% 。无论倾倒方向如何,翻转角度增加均会导致系统性能的进一步衰减,为翻转角度对系统性能的负面影响提供了量化参考。

(3)前后翻转方向会使制冷剂在蒸发器中的分布不均,且蒸发器表面空气流速不均,前翻转时系统性能优于后倾。左、右翻转时,蒸发器内制冷剂分布相对均匀,管路中的分布差异仍导致制冷量分别下降 0.179 kW 和 0.184 kW ,为系统设计和结构优化提供了基础数据。

总之,本研究证明了基于微油卧式涡旋压缩机的翻转式插箱空调系统能够适应不同倾倒角度和方向的工作条件,性能可靠且稳定。研究为雷达天线阵面等需要适应角度变化的设备的热管理提供了实践依据和技术支持,有助于该系统的进一步优化和实际应用推广。

参考文献:

- [1] LAO Jiayue, FU Wanwan, CHEN Liuwei, et al. Adjustable temperature and high thermal conductivity composite phase change material based on sodium acetate trihydrate-alanine/expanded graphite for thermal management of electronic devices [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 497: 154867.
- [2] LEE J, MUDAWAR I. Fluid flow and heat transfer characteristics of low temperature two-phase micro-channel heat sinks: part 1 experimental methods and flow visualization results [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51 (17/18): 4315-4326.
- [3] LEE J, MUDAWAR I. Low-temperature two-phase microchannel cooling for high-heat-flux thermal management of defense electronics [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2009, 32 (2): 453-465.
- [4] LAGUNA G, VILARRUBÍ M, IBÁÑEZ M, et al.

- Numerical parametric study of a hotspot-targeted microfluidic cooling array for microelectronics [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 144: 71-80.
- [5] KHATTAK Z, ALI H M. Air cooled heat sink geometries subjected to forced flow: a critical review [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 130: 141-161.
- [6] MAY G J. Development of valve-regulated lead/acid batteries for distributed power requirements [J]. *Journal of Power Sources*, 1996, 59(1/2): 147-151.
- [7] BAILEY C. Thermal management technologies for electronic packaging: current capabilities and future challenges for modelling tools [C]//2008 10th Electronics Packaging Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 527-532.
- [8] 路昭, 余小玲, 张立玉, 等. 锂电池组高温节点空气冷却方案的数值模拟 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(7): 25-31.
- LU Zhao, YU Xiaoling, ZHANG Liyu, et al. Numerical investigation for hotspots of stagger-arranged lithium-ion battery stack with air cooling strategy [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(7): 25-31.
- [9] 杨雨薇, 齐文亮, 王婉人, 等. 纳米冷却液在电子设备冷却中的应用 [J]. *机械研究与应用*, 2023, 36(3): 179-182.
- YANG Yuwei, QI Wenliang, WANG Wanren, et al. Application of nano coolant in electronic equipment cooling [J]. *Mechanical Research & Application*, 2023, 36(3): 179-182.
- [10] XU Guoping. Evaluation of a liquid cooling concept for high power processors [C]//Twenty-Third Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 190-195.
- [11] ALAWI O A, SIDIK N A C, MOHAMMED H A, et al. Fluid flow and heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: a review [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, 56: 50-62.
- [12] CHENG Wenlong, ZHANG Weiwei, CHEN Hua, et al. Spray cooling and flash evaporation cooling: the current development and application [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 614-628.
- [13] 李君浩, 任晓龙, 杨炯, 等. 锂电池冷板新波形微流道传热特性研究及结构优化 [J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(11): 14-26.
- LI Junhao, REN Xiaolong, YANG Jiong, et al. Research on heat transfer characteristics and structural optimization of new waveform microchannels for Lithium-Ion batteries cooling plates [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(11): 14-26.
- [14] CAO Yaling, XIA Wenqing, YU Li. Optimal performance of thermoelectric refrigeration system using entropy generation minimization method [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 22(4): 339-343.
- [15] LUO Jun, CHEN Lingen, SUN Fengrui, et al. Optimum allocation of heat transfer surface area for cooling load and COP optimization of a thermoelectric refrigerator [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(20): 3197-3206.
- [16] 滕明生, 秦清. 半导体制冷器在电子设备冷却系统中使用性能的优化及电算程序 [J]. *电子机械工程*, 1995(6): 34-39.
- TENG Mingsheng, QIN Qing. Optimization of performance and computer program for semiconductor refrigerators in electronic equipment cooling systems [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 1995(6): 34-39.
- [17] REMELI M F, DATE A, ORR B, et al. Experimental investigation of combined heat recovery and power generation using a heat pipe assisted thermoelectric generator system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 111: 147-157.
- [18] WANG Xiaoyuan, ZHU Yalu, ZHU Minzhao, et al. Thermal analysis and optimization of an ice and snow melting system using geothermy by super-long flexible heat pipes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 1353-1363.
- [19] 龙延, 魏进家, 吕斌. 不同倾角下平板型环路热管的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(5): 38-43.
- LONG Yan, WEI Jinjia, LV Xiao. Experimental study on loop heat pipe with flat evaporator at different tilt angles [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(5): 38-43.
- [20] CATANO J, ZHANG Tiejun, WEN J T, et al. Vapor compression refrigeration cycle for electronics cooling-

- part I: dynamic modeling and experimental validation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 66: 911-921.
- [21] WU Yuting, MA Chongfang, ZHONG Xiaohui. Development and experimental investigation of a miniature-scale refrigeration system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(1): 81-88.
- [22] 李武奇, 唐伯清, 张均勇, 等. 蒸汽压缩式制冷系统在航空中的应用 [J]. *飞机设计*, 2008, 28(2): 73-76.
LI Wuqi, TANG Baiqing, ZHANG Junyong, et al. Application of the steam compression refrigeration system in aviation [J]. *Aircraft Design*, 2008, 28(2): 73-76.
- [23] KANSARA K, SINGH V K, PATEL R, et al. Numerical investigations of phase change material (PCM) based thermal control module (TCM) under the influence of low gravity environment [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 167: 120811.
- [24] SINGH V K, PATEL A. Effect of mushy zone constant on the melting of a solid-liquid PCM under hypergravity conditions [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 134: 105993.
- [25] MADHUSUDHAN N K, NAJAFI H. Thermal design and parametric study of a greenhouse in microgravity conditions [C]//ASME 2022 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, USA; ASME, 2022; V008T11A003.
- [26] EFFENDI Y, FATTAH F, JUNIARDI A I. Analisis pengkondisian udara pada pesawat ATR 72-500 [J]. *Motor Bakar: Jurnal Teknik Mesin*, 2021, 5(2): 7-12.
- [27] PRASDITYA A G, HARTOPO H. Berkurangnya kinerja air conditioning system pesawat airbus A320-200 PK-AXU [J]. *Jurnal: Industri Elektro dan Penerbangan*, 2015, 5(1): 6-11.

(编辑 亢列梅)