

吊舱液冷系统低温工作及启动特性研究

龚文驰

(中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036)

摘要: **目的** 考察低温环境对吊舱液冷系统工作和启动特性的影响。**方法** 基于某型吊舱液冷系统, 模拟-55~25 °C场景, 开展温度对系统供液压力、膨胀罐液位、稳态电流、稳态功率及瞬态启动电流影响的试验研究。**结果** 供液压力随温度降低先增大、后减小, 并于5 °C下达到最大压力469.74 kPa。膨胀罐液位随温度降低逐渐减小, 且在25~5 °C降幅显著。稳态电流和功率随温度降低逐渐增大, 供电电流由3.6 A增大至8.1 A, 供电功率由100.8 W增大至226.8 W, 增幅为125%。瞬态启动电流随温度降低逐渐增大, 由5.44 A增大至13.40 A, 且显著大于对应温度下的稳态电流。**结论** 低温使得系统体积收缩及冷却液黏度增大, 吊舱液冷系统设计需充分考虑气蚀及过流风险。

关键词: 吊舱液冷系统; 低温工作; 低温启动; 供液压力; 液位; 稳态功率; 启动电流

中图分类号: V216

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)04-0135-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.04.017

Low-temperature Operation and Startup Characteristics of Liquid Cooling System for Pod

GONG Wenchi

(The 29th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the impact of the low-temperature environment on the operation and startup characteristics of the liquid cooling system for pod. Based on a certain type of pod liquid cooling system, the scenarios from -55 °C to 25 °C were simulated and the experimental research was carried out to study the impact of temperature on the liquid supply pressure, the liquid level of the expansion tank, the steady-state current and power, and the instantaneous startup current. The liquid supply pressure firstly increased and then decreased as the temperature dropped, reaching the maximum pressure of 469.74 kPa at 5 °C. The liquid level of the expansion tank gradually decreased as the temperature dropped, and the decline was significant within the range of 25 °C to 5 °C. The steady-state current and power gradually increased as the temperature dropped. The power supply current increased from 3.6 A to 8.1 A, and the power supply power increased from 100.8 W to 226.8 W, with an increase amplitude of 125%. The instantaneous startup current gradually increased as the temperature dropped, from 5.44 A to 13.40 A, and was significantly greater than the steady-state current at the corresponding temperature. Low temperature causes the system volume to shrink and the viscosity of the coolant to increase. The design of the liquid cooling system for pod needs to fully consider the risks of cavitation and overcurrent.

KEY WORDS: liquid cooling system for pod; low-temperature operation; low-temperature startup; liquid supply pressure; liquid level; steady-state power; startup current

收稿日期: 2025-01-08; 修订日期: 2025-02-17

Received: 2025-01-08; Revised: 2025-02-17

引文格式: 龚文驰. 吊舱液冷系统低温工作及启动特性研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(4): 135-140.

GONG Wenchi. Low-temperature Operation and Startup Characteristics of Liquid Cooling System for Pod[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(4): 135-140.

伴随电子设备集成度提升,吊舱散热需求大幅提高,液冷散热替代风冷散热占据主导^[1-5]。对于吊舱液冷系统,因其使用范围要求涵盖不同地区、不同季节、不同飞行高度对应的环境,通常需满足低至 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温下稳定运行的要求,无疑对其低温运行稳定性和启动特性提出严峻挑战。具体来讲,低温环境可能带来的风险有以下几点^[6-20]:1)冷却液黏度随温度的降低大幅增大,将导致同等流量下的系统流阻增大,使得液冷泵所需驱动扭矩和功率增大;2)液冷泵的叶轮和泵体在低温下可能发生收缩变形,从而影响泵的水力性能,进一步影响供液压力及流量的稳定性;3)密封材料在低温下可能变硬、变脆,压缩性能降低,影响密封效果的同时,可能引发管路连接处的泄漏问题。

吊舱液冷系统通常由液冷泵、换热器、液冷板、连接管路及传感器等部分组成,其中液冷泵包含泵、电机和控制器,为液冷系统核心部件,且对低温环境的敏感性最高,其低温适应性很大程度上决定了液冷系统的低温运行稳定性和启动特性。因此,众多学者针对液冷泵,借助理论研究、仿真分析及试验等手段开展了系列研究工作,涵盖液冷泵的低温启动时间、驱动力矩、流量变化、硬件保护电路设计、结构共振等领域。蒋明涌等^[19]通过试验研究了燃油泵的低温启动特性,结果显示, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,泵的启动特性时间分别为75、36 ms,表明低温使得泵的启动时间延长。阎耀保等^[20]仿真分析了不同温度下齿轮泵的驱动力矩特性,指出低温下泵的黏性摩擦功率和驱动力矩增大。刘芳等^[21]针对油冷系统的研究表明,低温环境使得系统供液流量下降。进一步,邱战国等^[22]建立了齿轮泵流量-温度计算模型,指出低温环境下齿轮泵的性能退化与环境温度存在强相关性,对比试验结果显示,计算模型具有良好的低温流量预测性能。苏志善等^[23]有关航空发动机燃油系统低温试验的研究指出,流体黏度随温度的变化特性在低温试验及设计中需得到重视。郭志伟等^[24]针对电子设备低温启动困难的问题,提出了一种适应于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温环境的启动电路设计方案,较好地解决设备低温启动问题。刘彦成等^[25]通过振动试验分析,指出柱塞泵低温启动过程中易激发结构共振,这要求泵在低温环境下需要承受更大的强度风险。

当前,公开文献虽然在液冷泵低温特性方面已有一定研究成果,指明低温环境下其存在驱动力矩增大、流量下降及共振等问题,但仍未见针对吊舱液冷系统的低温工作及启动特性试验研究,对实际应用过程中低温环境对吊舱液冷系统关键运行参数的影响更是尚不明确。综上,本文基于所研制的某型吊舱液冷系统,模拟其低温实际使用场景及系统实际运行状态,开展了温度对系统供液压力、膨胀罐液位、稳态电流、稳态功率及瞬态启动电流影响的试验研究。

1 试验

1.1 试验装置

吊舱液冷系统的功能是为吊舱大功率、高热流密度器件提供液冷散热能力,其主要包含液冷泵、液冷板、换热器、过滤器、膨胀罐、注液口、安全阀、功率器件(配试)及多个传感器及液冷管路等部分组成,如图1所示。其中,温度传感器用于获取回液温度,从而通过温度变化判断液冷系统的热平衡状态;液位传感器用于测量膨胀罐液位,反映运行过程中系统总容积的变化,尤其在温度及压力剧烈变化过程中热胀冷缩引起的系统容积变化,同时可间接反映系统泄漏情况;压力传感器用于检测液冷泵的回液及供液压力,反映液冷泵的运行状态。

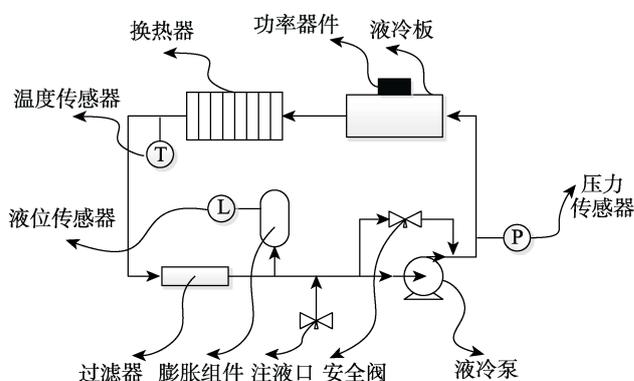


图1 吊舱液冷系统

Fig.1 Schematic diagram of liquid cooling system for pod

系统具体工作流程:确认系统液冷管路连接正常,通过注液口对系统内部进行抽真空处理,待真空度达到预设要求后,再经由注液口注液至预设液位,实时液位可通过膨胀罐处的液位传感器判断,至此完成抽真空及注液流程。系统运行时,液冷泵上电运行,提供压头驱动管路内的冷却液流动,至液冷板处吸收功率器件热耗升温,再至换热器处与冷源换热降温,后通过过滤器回到液冷泵入口,完成液冷散热流程。为保证多次试验的一致性,需统一系统测试前的抽真空及注液相关控制参数,与系统设计参数一并汇总于表1。

1.2 测试步骤

为测试吊舱液冷系统低温工作及启动特性,需借助高低温试验箱、直流电源、示波器等辅助设备。其中,高低温试验箱用于提供所需的低温环境,直流电源用于给系统供电,并记录稳态电流及功率,示波器则用于采集系统瞬时启动电流波形。

测试过程中的控制变量为环境温度,其测试范围为 $-55\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,因变量包含供液压力、膨胀罐液位、稳态电流、稳态功率和瞬态启动电流。

表 1 系统关键参数汇总
Tab.1 Summary of key system parameters

参数名称	数值	备注
供电电压	28 V	
额定功率	≤200 W	
系统总容积	2.0 L	
膨胀罐总容积	340 mL	
冷却液种类	AF65 号冷却液	
稳态散热功率	3 kW	参考值
真空压力	0~5 kPa	
起始环境温度	(25±3) °C	
起始环境压力	98±3 kPa	
起始膨胀罐液位	45%~55%	
起始供液压力	350~450 kPa	

具体测试步骤如下:

- 1) 确认液冷系统内部机械、电气及液路接口连接正常;
- 2) 确保液冷系统完成注液过程, 并达到表 1 明确的起始状态要求;
- 3) 将液冷系统整体置于高低温试验箱内;
- 4) 确认液冷系统与测试设备连接正常;
- 5) 确定当前工况环境温度要求值, 并设置高低温试验箱目标温度为要求值;
- 6) 待高低温试验箱温度达到要求后, 继续保温 2 h;
- 7) 液冷系统上电, 启动运行, 示波器同步记录瞬态启动电流;
- 8) 上电运行 5 min 稳定后, 记录供液压力、膨胀罐液位、稳态电流、稳态功率;
- 9) 液冷系统下电, 完成一次工况测试流程;
- 10) 按要求改变环境温度要求值, 重复步骤 5)~9), 直至完成所有测试工况。

2 结果及分析

基于所述液冷系统所开展的低温试验结果, 分析温度对供液压力、膨胀罐液位、稳态电流、稳态功率及瞬态启动电流的影响。

2.1 温度对供液压力的影响

系统供液压力随环境温度的变化关系如图 2 所示。可见, 在-55~25 °C, 供液压力随温度的降低先增大, 5 °C 下达到最大压力 469.74 kPa 后, 逐步减小, 在-55 °C 时达到最小压力 315.79 kPa, 相比峰值压力降低约 32.77%。当环境温度降低时, AF65 号冷却液运动黏度单调增大, 运动黏度增大使驱动冷却液流动更加困难, 导致系统供液压力呈下降趋势。在 5~25 °C, 供液压力随温度降低而增大, 这是由于此

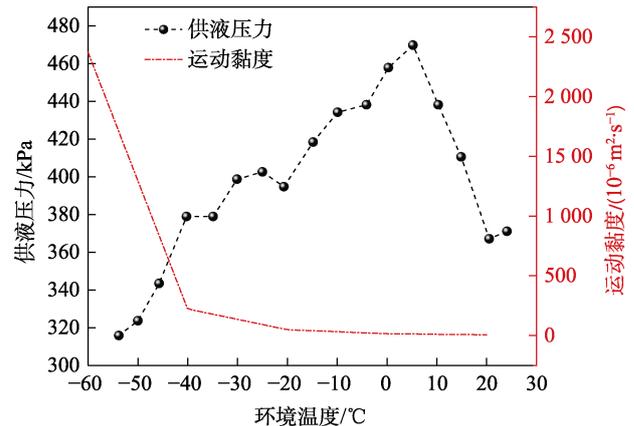


图 2 供液压力和运动黏度随环境温度的变化关系
Fig.2 Liquid supply pressure and kinematic viscosity versus ambient temperature

温度范围内冷却液运动黏度变化并不明显, 同时因系统流量及压力脉动导致。

2.2 温度对膨胀罐液位的影响

系统膨胀罐液位实测值随环境温度的变化关系如图 3 所示。可见, 在-55~25 °C, 膨胀罐液位随温度降低单调减小, 液位由 52.89% 减小至 38.82%, 这是由冷却液的热胀冷缩特性决定的。同时, 考虑冷却液密度随温度的变化关系, 结合起始环境温度、起始膨胀罐液位、系统总注液容积及膨胀罐总容积等已知参数, 进而可理论计算得出系统膨胀罐液位随环境温度的变化关系。对比膨胀罐液位实测值和计算值, 计算值随温度降低近似线性降低, 实测值则在 5~25 °C 显著降低, 在-55~5 °C 缓慢降低, 且全温区液位降幅略低于计算值。这是由于实际系统中, 抽真空过程真空度不可能达到 0, 因此系统中必然留存部分气体, 膨胀罐液位变化受液体和气体收缩两部分的影响, 气体收缩主要受供液压力影响。参照图 2 可知, 气体体积在 5~25 °C 因供液压力升高而收缩, 而在-55~5 °C 供液压力降低而膨胀。因此, 叠加液体热胀冷缩效应,

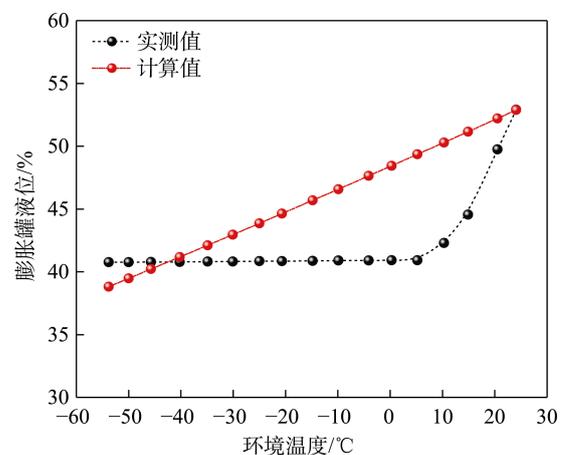


图 3 膨胀罐液位随环境温度的变化关系
Fig.3 Expansion tank level versus ambient temperature

膨胀罐液位随温度降低先显著降低,后缓慢降低。由于 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下对应的供液压力低于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的供液压力,导致实测值全温区液位降幅略低于计算值。若膨胀罐可变容积及初始液位不合理,低温下系统中可能出现气泡,增大气蚀风险。

2.3 温度对稳态电流及功率的影响

系统稳态供电电流、电压及功率随环境温度的变化关系如图4所示。可见,在 $-55\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,供电电压维持 28 V 不变,供电电流及功率随着随温度降低单调增大,供电电流由 3.6 A 增大至 8.1 A ,供电功率由 100.8 W 增大至 226.8 W ,增大幅度达到 125% 。稳态电流和功率增大主要原因为冷却液黏度随温度降低大幅增大,使得液冷泵低温下驱动冷却液流动需要更大的驱动扭矩,这要求设计之初需充分考虑低温影响。综上,鉴于吊舱液冷系统需适应 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的使用环境,在开展常温设计的同时,需为低温运行预留足够设计余量或制定保护措施,避免过流、过负载可能导致的系统故障。

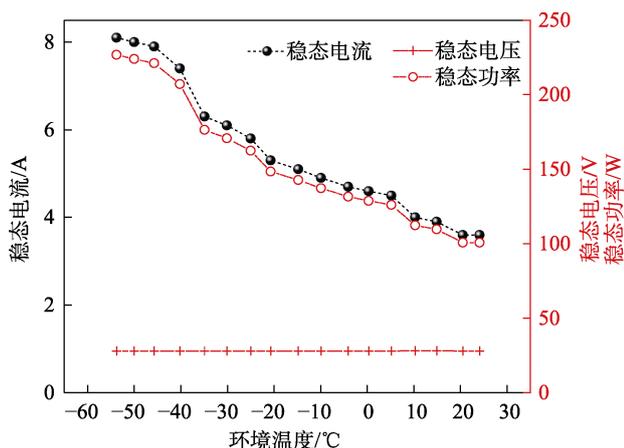


图4 稳态电流、电压及功率随环境温度的变化关系
Fig.4 Current, voltage and power of steady state versus ambient temperature

2.4 温度对瞬态启动电流的影响

稳态电流及启动电流随环境温度变化的对比如图5所示。可见,不同温度下的瞬态启动电流均显著大于稳态电流,增大幅度为 $21\%\sim 46\%$,且环境温度相对更低时,启动电流的增大幅度更大。低温启动瞬间,因冷却液黏度及启动力矩较大,使得瞬态启动电流大,待系统稳定运行之后,冷却液温度上升,黏度下降后,使得稳态电流相比瞬态启动电流减小。此外,瞬态启动电流随温度降低逐渐增大,由 5.44 A 增大至 13.40 A (为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 稳态电流 3.6 A 的 3.72 倍)。上述结果表明,低温启动过流风险极高,是提升吊舱液冷系统低温可靠性的关键。

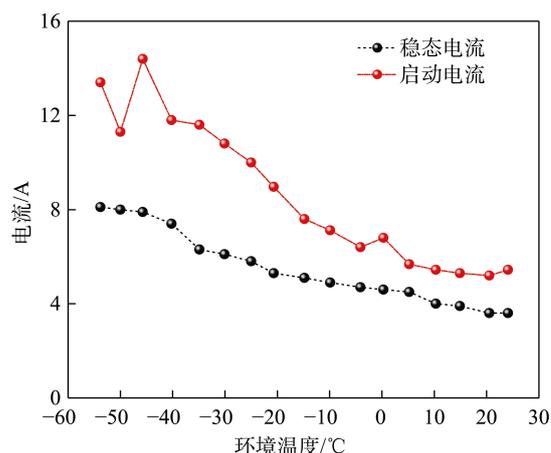


图5 稳态电流及启动电流随环境温度的变化关系
Fig.5 Current of steady and starting state versus ambient temperature

3 结论

本文就低温环境对吊舱液冷系统工作及启动特性开展了试验研究,结果表明,在 $-55\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度变化对系统供液压力、膨胀罐液位、稳态电流、稳态功率及启动电流具有显著影响,主要结论如下:

- 1) 供液压力随温度降低先增大、后减小, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下达到最大压力 469.74 kPa 。
- 2) 膨胀罐液位随温度降低而逐渐降低,其下降趋势受供液压力和系统初始抽真空状态的影响,叠加气体压缩和液体热胀冷缩效应,在 $25\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的降幅最为显著。
- 3) 稳态电流、稳态功率随温度降低逐渐增大,供电电流由 3.6 A 增大至 8.1 A ,供电功率由 100.8 W 增大至 226.8 W ,增大幅度为 125% ,主要受液体黏度显著增大影响。
- 4) 瞬态启动电流随温度降低逐渐增大,由 5.44 A 增大至 13.40 A ,且显著大于稳态电流。

结合上述结论,给工程应用如下启示:一是吊舱液冷系统需充分考虑低温启动过流风险,可通过设置过流保护电路、缓启动策略、与温度关联的降转速控制逻辑等措施,保证系统的低温可靠性;二是综合考虑液体热胀冷缩和气体压缩膨胀,液冷系统中必须合理设计膨胀罐可变容积,制定初始注液液位要求,保证液冷系统内尽可能保持全液相状态,避免气蚀风险。

参考文献:

- [1] 包胜,王敬韬,司俊珊,等.液冷电子吊舱温度环境测试研究[J].装备环境工程,2022,19(4):80-85.
BAO S, WANG J T, SI J S, et al. Ambient Temperature Inside Liquid-Cooled Electronic Pod[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 80-85.

- [2] 包胜, 胡博, 褚鑫, 等. 电子吊舱温度环境测试分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 43-47.
BAO S, HU B, CHU X, et al. A Survey Analysis of Ambient Temperature Inside Electronic Pod[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(8): 43-47.
- [3] 叶元鹏, 褚鑫, 李应杰, 等. 电子吊舱液冷系统指标匹配研究[J]. 机械与电子, 2023, 41(8): 14-18.
YE Y P, CHU X, LI Y J, et al. Research on Index Matching of Liquid Cooling System for Electronic Pod[J]. Machinery & Electronics, 2023, 41(8): 14-18.
- [4] 吴学群, 卢建, 杭磊. 机载电子吊舱环控方法优化研究[J]. 现代雷达, 2023, 45(3): 77-83.
WU X Q, LU J, HANG L. A Study on the Optimization of Environmental Control Method for Airborne Avionics Pods[J]. Modern Radar, 2023, 45(3): 77-83.
- [5] 刘学杰, 吕超, 牛亚宏, 等. 风冷式及液冷式机载电负载系统研究[J]. 科技创新与应用, 2015, 5(18): 74.
LIU X J, LYU C, NIU Y H, et al. Research on Air-Cooled and Liquid-Cooled Airborne Electric Load System[J]. Technology Innovation and Application, 2015, 5(18): 74.
- [6] 胡涛, 吴洋, 孙茂钧, 等. 硅橡胶低温环境性能研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 33-39.
HU T, WU Y, SUN M J, et al. Performance of Silicon Rubber at Low Temperature[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 33-39.
- [7] 姚新祥, 熊硕, 杨伟奇. 超低温条件下直流电机启动性能的研究与分析[J]. 家电科技, 2021(6): 107-109.
YAO X X, XIONG S, YANG W Q. Research and Analysis on Starting Performance of DC Motor under Ultra-Low Temperature[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2021(6): 107-109.
- [8] 周宁宁, 曲建俊. 真空低温下环形行波超声波电机负载特性试验研究[C]// 第十四届中国小电机技术研讨会论文集. 上海: 中国电工技术学会, 2009.
ZHOU N N, QU J J. Experimental Study on Load Characteristics of Ring Traveling Wave Ultrasonic Motor under Vacuum and Low Temperature[C]// Proceedings of the 14th China Small Motor Technology Symposium China Small Motor Technology Seminar. Shanghai: China Electrotechnical Society, 2009.
- [9] 阎智慧, 胡前. 柴油发动机高原低温启动试验研究[J]. 中国内燃机学会, 2007.
YAN Z H, HU Q. Experimental Study on Plateau and Low Temperature Starting of Diesel Engines[J]. Chinese Society for Internal Combustion Engines, 2007.
- [10] 周创辉, 卿绿军, 晁文雄. 液压泵高低温试验系统设计与应用[J]. 液压气动与密封, 2024, 44(6): 30-33.
ZHOU C H, QING L J, CHAO W X. Design and Application of High-Low Temperature Test Bench for Hydraulic Pump[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2024, 44(6): 30-33.
- [11] 王琦, 方立辉, 辛海霞, 等. 高低温对混合动力用自动变速器电子油泵性能的影响研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(21): 149-152.
WANG Q, FANG L H, XIN H X, et al. Influence of High and Low Temperature on the Performance of Electronic Pump for Automatic Transmission of Hybrid Power System[J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46(21): 149-152.
- [12] 郑智剑, 王洋定, 吴世锋, 等. 液压泵、液压马达高低温试验平台的设计[J]. 液压气动与密封, 2020, 40(4): 59-62.
ZHENG Z J, WANG Y D, WU S F, et al. Design of High and Low Temperature Performance Testing Platform for Hydraulic Pump and Motor[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2020, 40(4): 59-62.
- [13] 陈经跃, 李奕宁, 曹伟, 等. 某型航空液压泵低温渗油故障研究[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(7): 73-75.
CHEN J Y, LI Y N, CAO W, et al. Study on Low Temperature Oil Leakage Fault of an Aero Hydraulic Pump[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2019, 39(7): 73-75.
- [14] 陈忠灿, 承磊, 王天祥, 等. 空间热环境模拟技术的发展及研究现状[J]. 低温与超导, 2016, 44(4): 6-13.
CHEN Z C, CHENG L, WANG T X, et al. Development and Status of Space Thermal Environment Simulation Researches[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2016, 44(4): 6-13.
- [15] 刘曦, 张俊, 邓笑琛, 等. 用于解决内部泵低温启动困难的液冷充电枪线冷却模块: CN217574887U[P]. 2022-10-14.
LIU X, ZHANG J, DENG X C, et al. Cooling Module of Liquid-cooled Charging Gun for Solving the Difficulty of Starting the Internal Pump at Low Temperatures: CN217574887U[P]. 2022-10-14.
- [16] 董庆伟, 王义城, 李阁强, 等. 温度对双圆弧斜齿齿轮泵性能的数值模拟研究[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(10): 1-6.
DONG Q W, WANG Y C, LI G Q, et al. Numerical Simulation of Temperature on the Performance of Double Arc Helical Gear Pump[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023, 43(10): 1-6.
- [17] 王格, 王怡锦, 贺登辉, 等. 航空润滑油系统旋板泵空化特性及对泵性能影响[J/OL]. 航空动力学报, 2025: 1-10[2025-01-06]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240106>.
WANG G, WANG Y J, HE D H, et al. Cavitation Characteristics of Rotary Vane Pump in Aeroengine Lubricating Oil System and Their Effects on Pump Performance [J/OL]. Journal of Aerospace Power, 2025: 1-10[2025-01-06]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240106>.
- [18] 朱汗青, 田睿, 马广顺. 4×250kW 发电机组低温环境适应性试验研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 41-44.
ZHU H Q, TIAN R, MA G S. Experimental Study on Low-Temperature Environment Adaptability of 4×250 kW Generator Set[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(1): 41-44.
- [19] 蒋明涌, 王慰慈, 固丹初, 等. 燃油泵低温启动特性试验测试装置[J]. 柴油机, 2012, 34(4): 28-30.
JIANG M Y, WANG W C, GU D C, et al. Test System for

- Fuel Pump's Low Temperature Starting Characteristics[J]. Diesel Engine, 2012, 34(4): 28-30.
- [20] 简耀保, 赵帅峰, 王东, 等. 极端低温下外啮合齿轮泵流量脉动特性分析[J]. 流体测量与控制, 2023, 4(3): 1-6.
- YIN Y B, ZHAO S F, WANG D, et al. Flow Pulsation Characteristics of External Gear Pump under Extreme Low Temperature[J]. Fluid Measurement & Control, 2023, 4(3): 1-6.
- [21] 刘芳, 单凯凌, 王健. 油冷电驱动中电子油泵的设计开发[J]. 汽车零部件, 2023(5): 41-46.
- LIU F, SHAN K L, WANG J. Design and Development of Electronic Oil Pump for Oil-Cooled Electric Drive[J]. Automobile Parts, 2023(5): 41-46.
- [22] 邱战国, 胡淼, 邢群雁, 等. 基于维纳过程的低温环境下齿轮泵性能退化研究[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(2): 155-163.
- QIU Z G, HU M, XING Q Y, et al. Study on Performance Degradation of Gear Pump in Low-Temperature Environment Based on Wiener Process[J]. China Railway Science, 2024, 45(2): 155-163.
- [23] 苏志善, 李华聪, 徐刚刚. 航空发动机燃油系统附件低温试验方法[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 94-100.
- SU Z S, LI H C, XU G G. Low Temperature Test Method for Aviation Engine Fuel System Accessories[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(6): 94-100.
- [24] 郭志伟, 张磊. 临近空间电子设备低温启动与加热方案设计[J]. 电子器件, 2024, 47(4): 941-946.
- GUO Z W, ZHANG L. The Method of Low Temperature Starting and Heating for near Space Electronic Devices[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2024, 47(4): 941-946.
- [25] 刘彦成, 孙晔, 赵昱舒. 液压柱塞泵低温启动试验振动测量与分析[C]// 2023年中国航空工业技术装备工程协会年会论文集. 西安: 中国航空工业技术装备工程协会, 2023.
- LIU Y C, SUN Y, ZHAO Y S. Vibration Measurement and Analysis of Hydraulic Axial Piston Pump During Low-Temperature Start-Up Test[C]// Proceedings of the Annual Conference of the China Aviation Industry Technology and Equipment Engineering Association in 2023. Xi'an: China Aviation Industries Technology Equipment Engineering Association, 2023.